

第一章 结构静力分析

1. 1 结构分析概述

结构分析的定义：结构分析是有限元分析方法最常用的一个应用领域。结构这个术语是一个广义的概念，它包括土木工程结构，如桥梁和建筑物；汽车结构，如车身骨架；海洋结构，如船舶结构；航空结构，如飞机机身等；同时还包括机械零部件，如活塞，传动轴等等。

在 ANSYS 产品家族中有七种结构分析的类型。结构分析中计算得出的基本未知量（节点自由度）是位移。其他的一些未知量，如应变，应力，和反力可通过节点位移导出。

静力分析--用于求解静力载荷作用下结构的位移和应力等。静力分析包括线性和非线性分析。而非线性分析涉及塑性，应力刚化，大变形，大应变，超弹性，接触面和蠕变。

模态分析--用于计算结构的固有频率和模态。

谐波分析--用于确定结构在随时间正弦变化的载荷作用下的响应。

瞬态动力分析--用于计算结构在随时间任意变化的载荷作用下的响应，并且可计及上述提到的静力分析中所有的非线性性质。

谱分析--是模态分析的应用拓广，用于计算由于响应谱或 PSD 输入（随机振动）引起的应力和应变。

屈曲分析--用于计算屈曲载荷和确定屈曲模态。ANSYS 可进行线性（特征值）和非线性屈曲分析。

显式动力分析--ANSYS/LS-DYNA 可用于计算高度非线性动力学和复杂的接触问题。

此外，前面提到的七种分析类型还有如下特殊的分析应用：

- 断裂力学
- 复合材料
- 疲劳分析
- p-Method

结构分析所用的单元：绝大多数的 ANSYS 单元类型可用于结构分析，单元型从简单的杆单元和梁单元一直到较为复杂的层合壳单元和大应变实体单元。

1. 2 结构线性静力分析

静力分析的定义

静力分析计算在固定不变的载荷作用下结构的效应，它不考虑惯性和阻尼的影响，如结构受随时间变化载荷的情况。可是，静力分析可以计算那些固定不变的惯性载荷对结构的影响（如重力和离心力），以及那些可以近似为等价静力作用的随时间变化载荷（如通常在许多建筑规范中所定义的等价静力风载和地震载荷）。

静力分析中的载荷

静力分析用于计算由那些不包括惯性和阻尼效应的载荷作用于结构或部件上引起的位移，应力，应变和力。固定不变的载荷和响应是一种假定；即假定载荷和结构的响应随时间的变化非常缓慢。静力分析所施加的载荷包括：

- 外部施加的作用力和压力
- 稳态的惯性力（如中力和离心力）
- 位移载荷
- 温度载荷

线性静力分析和非线性静力分析

静力分析既可以是线性的也可以是非线性的。非线性静力分析包括所有的非线性类型：大变形，塑性，蠕变，应力刚化，接触（间隙）单元，超弹性单元等。本节主要讨论线性静力分析，非线性静力分析在下一节中介绍。

线性静力分析的求解步骤

1. 建模
2. 施加载荷和边界条件，求解
3. 结果评价和分析

目 录

非线性结构分析的定义.....	1
非线性行为的原因.....	1
非线性分析的重要信息.....	3
非线性分析中使用的命令.....	8
非线性分析步骤综述.....	8
第一步：建模.....	9
第二步：加载且得到解.....	9
第三步：考察结果.....	16
非线性分析例题（GUI 方法）.....	20
第一步：设置分析标题.....	21
第二步：定义单元类型.....	21
第三步：定义材料性质.....	22
第四步：定义双线性各向同性强化数据表.....	22
第五步：产生矩形.....	22
第六步：设置单元尺寸.....	23
第七步：划分网格.....	23
第八步：定义分析类型和选项.....	23
第九步：定义初始速度.....	24
第十步：施加约束.....	24
第十一步：设置载荷步选项.....	24
第十二步：求解.....	25
第十三步：确定柱体的应变.....	25
第十四步：画等值线.....	26
第十五步：用 Post26 定义变量.....	26
第十六步：计算随时间变化的速度.....	26
非线性分析例题（命令流方法）.....	27

1. 3 非线性结构静力分析

非线性结构的定义

在日常生活中,会经常遇到结构非线性。例如,无论何时用钉书针钉书,金属钉书钉将永久地弯曲成一个不同的形状。(看图 1—1 (a))如果你在一个木架上放置重物,随着时间的迁移它将越来越下垂。(看图 1—1 (b))。当在汽车或卡车上装货时,它的轮胎和下面路面间接触将随货物重量的增加而变化。

(看图 1—1 (c))如果将上面例子所载荷变形曲线画出来,你将发现它们都显示了非线性结构的基本特征--变化的结构刚性。



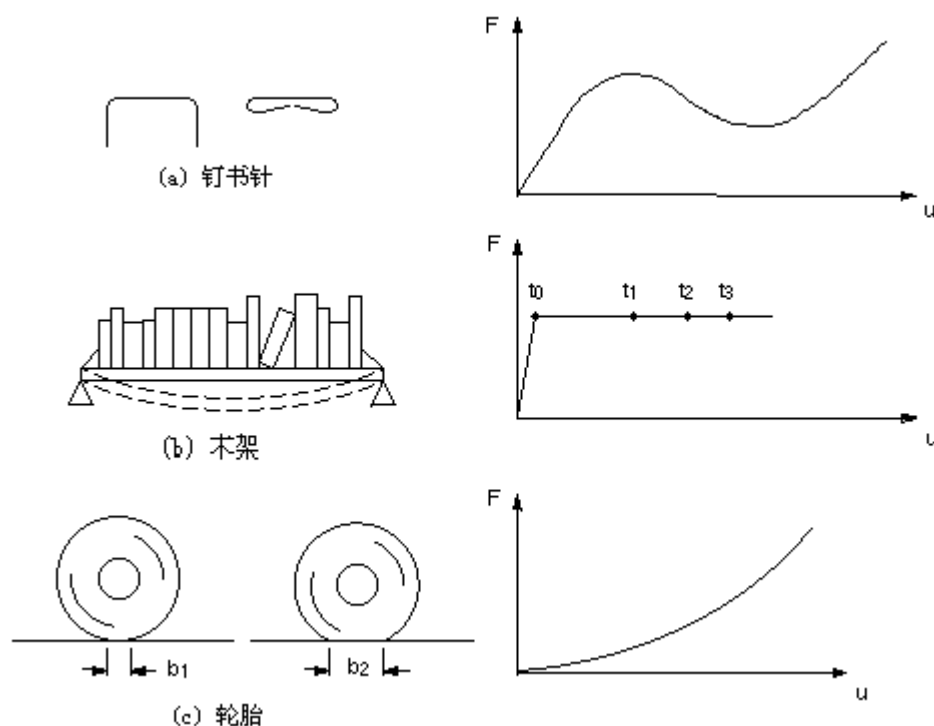


图 1—1 非线性结构行为的普通例子

非线性行为的原因

引起结构非线性的原因很多，它可以被分成三种主要类型：

状态变化（包括接触）

许多普通结构的表现出一种与状态相关的非线性行为，例如，一根只能拉伸的电缆可能是松散的，也可能是绷紧的。轴承套可能是接触的，也可能是不接触的，冻土可能是冻结的，也可能是融化的。这些系统的刚度由于系统状态的改变在不同的值之间突然变化。状态改变也许和载荷直接有关（如在电缆情况中），也可能由某种外部原因引起（如在冻土中的紊乱热力学条件）。ANSYS 程序中单元的激活与杀死选项用来给这种状态的变化建模。

接触是一种很普遍的非线性行为，接触是状态变化非线性类型中一个特殊而重要的子集。

几何非线性

如果结构经受大变形，它变化的几何形状可能会引起结构的非线性地响应。一个例的垂向刚性）。随着垂向载荷的增加，杆不断弯曲以致于动力臂明显地减少，导致杆端显示出在较高载荷下不断增长的刚性。

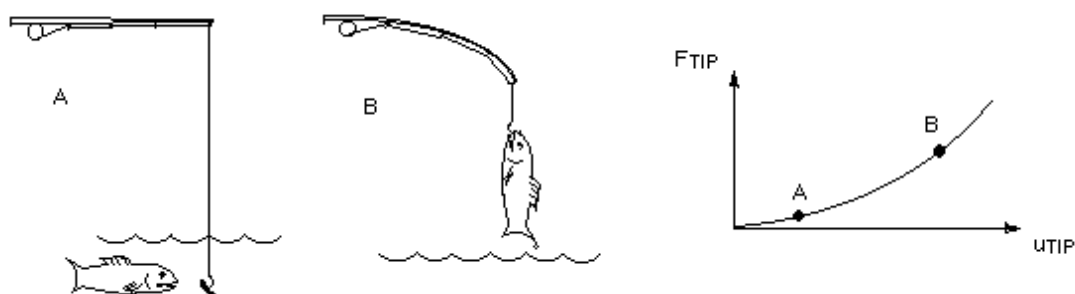


图 1—2 钓鱼杆示范几何非线性

材料非线性

非线性的应力—应变关系是结构非线性名的常见原因。许多因素可以影响材料的应力

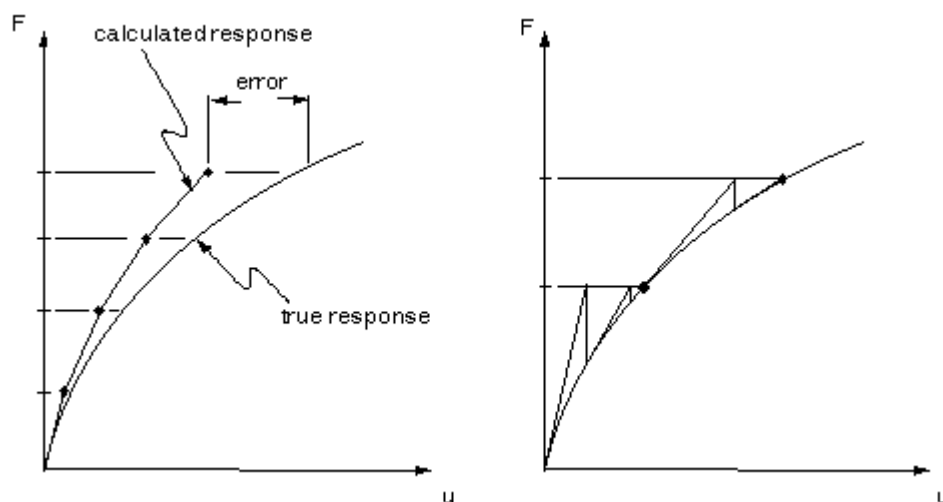
——应变性质，包括加载历史（如在弹—塑性响应状况下），环境状况（如温度），加载的时间总量（如在蠕变响应状况下）。

牛顿—拉森方法

ANSYS 程序的方程求解器计算一系列的联立线性方程来预测工程系统的响应。然而，非线性结构的行为不能直接用这样一系列的线性方程表示。需要一系列的带校正的线性近似来求解非线性问题。

逐步递增载荷和平衡迭代

一种近似的非线性求解是将载荷分成一系列的载荷增量。可以在几个载荷步内或者在一个载荷步的几个子步内施加载荷增量。在每一个增量的求解完成后，继续进行下一个载荷增量之前程序调整刚度矩阵以反映结构刚度的非线性变化。遗憾的是，纯粹的增量近似不可避免地随着每一个载荷增量积累误差，导致结果最终失去平衡，如图 1—3 (a) 所示。



(a) 纯粹增量式解

(b) 全牛顿—拉普森迭代求解 (2 个载荷增量)

图 8—3 纯粹增量近似与牛顿—拉普森近似的关系。

ANSYS 程序通过使用牛顿—拉普森平衡迭代克服了这种困难，它迫使在每一个载荷增量的末端解达到平衡收敛（在某个容限范围内）。图 1—3 (b) 描述了在单自由度非线性分析中牛顿—拉普森平衡迭代的使用。在每次求解前，NR 方法估算出残差矢量，这个矢量是回复力（对应于单元应力的载荷）和所加载荷的差值。程序然后使用非平衡载荷进行线性求解，且核查收敛性。如果不满足收敛准则，重新估算非平衡载荷，修改刚度矩阵，获得新解。持续这种迭代过程直到问题收敛。

ANSYS 程序提供了一系列命令来增强问题的收敛性，如自适应下降，线性搜索，自动载荷步，及二分等，可被激活来加强问题的收敛性，如果不能得到收敛，那么程序或者继续计算下一个载荷步或者终止（依据你的指示）。

对某些物理意义上不稳定系统的非线性静态分析，如果你仅仅使用 NR 方法，正切刚度矩阵可能变为降秩矩阵，导致严重的收敛问题。这样的情况包括独立实体从固定表面分离的静态接触分析，结构或者完全崩溃或者“突然变成”另一个稳定形状的非线性弯曲问题。对这样的情况，你可以激活另外一种迭代方法，弧长方法，来帮助稳定求解。弧长方法导致 NR 平衡迭代沿一段弧收敛，从而即使当正切刚度矩阵的倾斜为零或负值时，也往往阻止发散。这种迭代方法以图形表示在图 1—4 中。

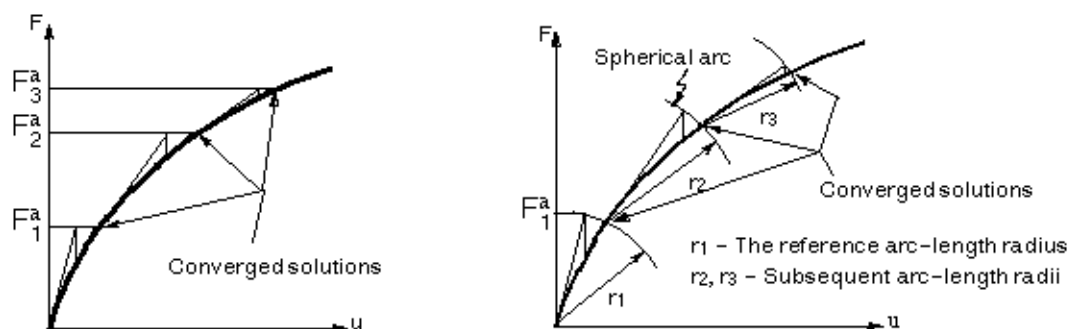


图 1—4 传统的 NR 方法与弧长方法的比较

非线性求解的组织级别

非线性求解被分成三个操作级别：载荷步、子步、平衡迭代。

- “顶层”级别由在一定“时间”范围内你明确定义的载荷步组成。假定载荷在载荷步内是线性地变化的。
- 在每一个载荷步内，为了逐步加载可以控制程序来执行多次求解（子步或时间步）。
- 在每一个子步内，程序将进行一系列的平衡迭代以获得收敛的解。

图 1—5 说明了一段用于非线性分析的典型的载荷历史。

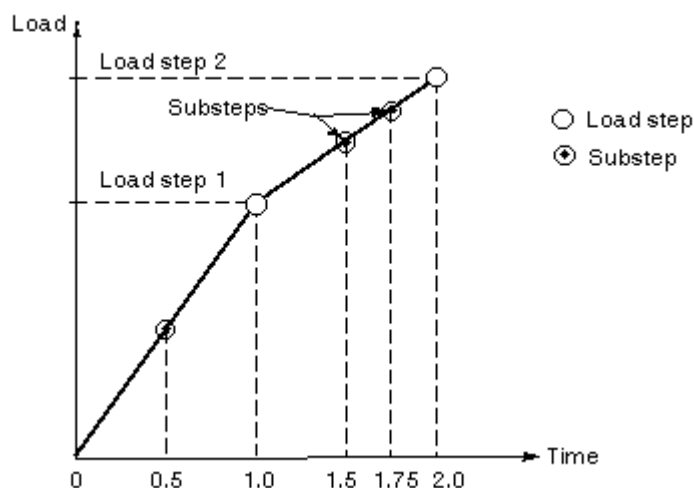


图 1—5 载荷步、子步、及“时间”

收敛容限

当你对平衡迭代确定收敛容限时，你必须答这些问题：

- 你想基于载荷，变形，还是联立二者来确定收敛容限？
- 既然径向偏移（以弧度度量）比对应的平移小，你是不是想对这些不同的条目建立不同的收敛准则？

当你确定收敛准则时，ANSYS 程序会给你一系列的选择：你可以将收敛检查建立在力，力矩、位移、转动或这些项目的任意组合上。另外，每一个项目可以有不同的收敛容限值。对多自由度问题，你同样也有收敛准则的选择问题。

当你确定你的收敛准则时，记住以力为基础的收敛提供了收敛的绝对量度，而以位移为基础的收敛仅提供了表观收敛的相对量度。因此，你应当如果需要总是使用以力为基础（或以力矩为基础的）收敛容限。如果需要可以增加以位移为基础（或以转动为基础的）收敛检查，但是通常不单独使用它们。

图 1—6 说明了一种单独使用位移收敛检查导致出错情况。在第二次迭代后计算出的位移很小可能被认为是收敛的解，尽管问题仍旧远离真正的解。要防止这样的错误，应当使

用力收敛检查。

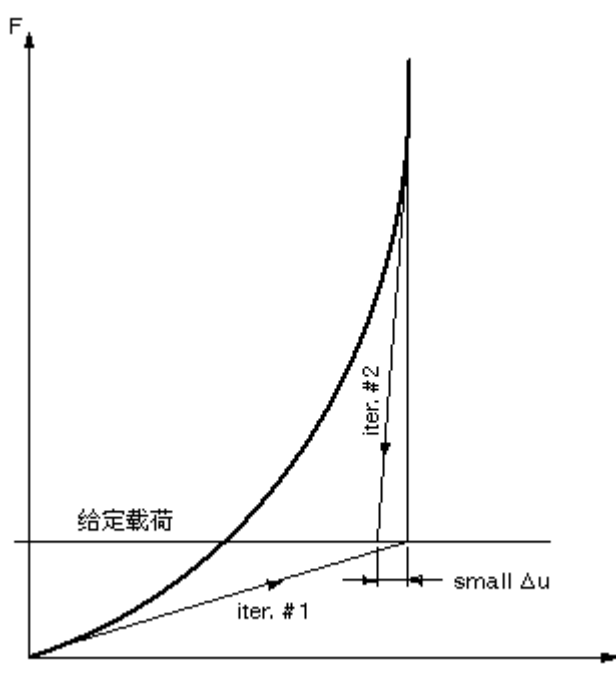


图 1—6 完全依赖位移收敛检查有时可能产生错误的结果。

保守行为与非保守行为：过程依赖性

如果通过外载输入系统的总能量当载荷移去时复原，我们说这个系统是保守的。如果能量被系统消耗（如由于塑性应变或滑动摩擦），我们说系统是非保守的，一个非守恒系统的例子显示在图 1—7。

一个保守系统的分析是与过程无关的；通常可以任何顺序和以任何数目的增量加载而不影响最终结果。相反地，一个非保守系统的分析是过程相关的；必须紧紧跟随系统的实际加载历史，以获得精确的结果。如果对于给定的载荷范围，可以有多于一个的解是有效的（如在突然转变分析中）这样的分析也可能是过程相关的。过程相关问题通常要求缓慢加载（也就是，使用许多子步）到最终的载荷值。

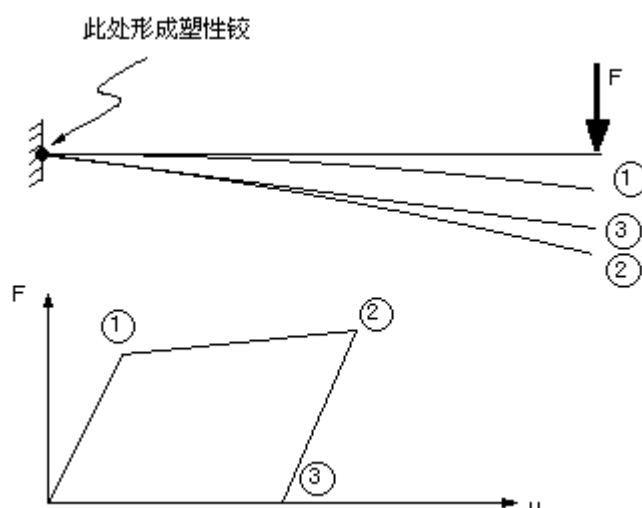


图 1—7 非守恒（过程相关的）过程

子步

当使用多个子步时，你需要考虑精度和代价之间的平衡；更多的子步骤（也就是，小的时间步）通常导致较好的精度，但以增多的运行时间为代价。ANSYS 提供两种方法来控制

子步数:

- 子步数或时间步长

我们即可以通过指定实际的子步数也可以通过指定时间步长控制子步数。

- 自动时间步长

ANSYS 程序，基于结构的特性和系统的响应，来调查时间步长

子步数

如果你的结构在它的整个加载历史期间显示出高度的非线性特点，而且你对结构的行子解足够好可以确保深到收敛的解，那么你也许能够自己确定多小的 时间步长是必需的，且对所有的载荷步使用这同一时间步。（务必允许足够大的 平衡迭代数）。

自动时间分步

如果你预料你的结构的行为将从线性到非线性变化，你也许想要在系统响应的非线性部分期间变化时间步长。在这样一种情况，你可以激活自动时间分步以 便随需要调整时间步长，获得精度和代价之间的良好平衡。同样地，如果你不确信你的问题将成功地收敛，你也许想要使用自动时间分步来激活 ANSYS 程序的二分特点。

二分法提供了一种对收敛失败自动矫正的方法。无论何时只要平衡迭代收敛失败，二分法将把时间步长分成两半，然后从最后收敛的子步自动重新启动，如果已二分的时间步再次收敛失败，二分法将再次分割时间步长然后重新启动，持续这一过程直到获得收敛或到达最小时间步长（由你指定）。

载荷和位移方向

当结构经历大变形时应该考虑到载荷将发生了什么变化。在许多情况中，无论结构如何变形施加在系统中的载荷保持恒定的方向。而在另一些情况中，力将 改变方向，随着单元方向的改变而变化。

ANSYS 程序对这两种情况都可以建模，依赖于所施加的载荷类型。加速度和集中力将 不管单元方向的改变而保持它们最初的方向，表面载荷作用在变形单元表面的法向，且可被用来模拟“跟随”力。图 1—8 说明了恒力和跟随力。

注意——在大变形分析中不修正结点坐标系方向。因此计算出的位移在最初的方向上输出。

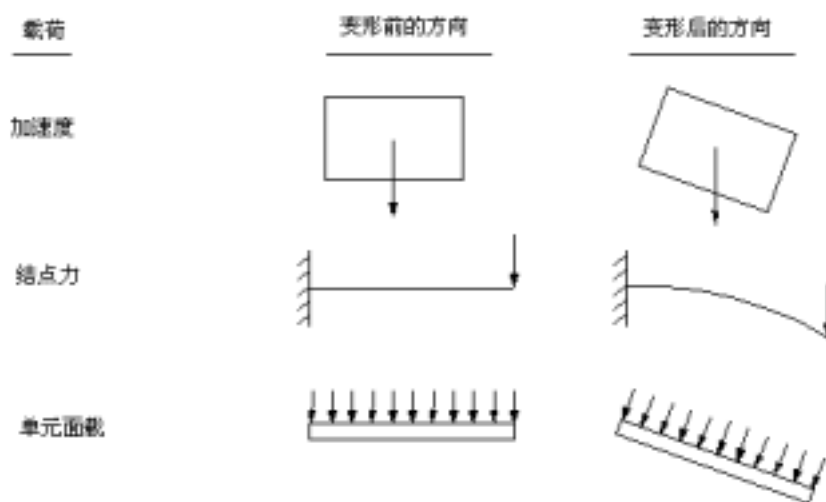


图 1—8 变形前后载荷方向

非线性瞬态过程的分析

用于分析非线性瞬态行为的过程，与对线性静态行为的处理：相似以步进增量加载，程序在每一步中进行平衡迭代。静态和瞬态处理的主要不同是在瞬态过程分析中要激活时间积分效应。（因此，在瞬态过程分析中“时间”总是表示实际的时序。）自动时间分步和二等分特点同样也适用于瞬态过程分析。

非线性分析中用到的命令

使用与任何其它类型分析的同一系列的命令来建模和进行非线性分析。同样，无论你正在进行何种类型的分析，你可从用户图形界面 GUI 选择相似的选项来建模和求解问题。

本章后面的部分”非线性实例分析（命令），给你显示了使用批处理方法用 ANSYS 分析一个非线性分析时的一系列命令。另一部分“非线性实例分析（GUI 方法）”，给你显示了如何从 ANSYS 的 GUI 中执行同样的例子分析。

非线性分析步骤综述

尽管非线性分析比线性分析变得更加复杂，但处理基本相同。只是在非线性分析的适当过程中，添加了需要的非线性特性。

如何进行非线性静态分析

非线性静态分析是静态分析的一种特殊形式。如同任何静态分析，处理流程主要由三个主要步骤组成：

- 1、建模。
- 2、加载且得到解。
- 3、考察结果。

步骤 1：建模

这一步对线性和非线性分析都是必需的，尽管非线性分析在这一步中可能包括特殊的单元或非线性材料性质，如果模型中包含大应变效应，应力—应变数据必须依据真实应力和真实（或对数）应变表示。

步骤 2：加载且得到解

在这一步中，你定义分析类型和选项，指定载荷步选项，开始有限元求解。既然非线性求解经常要求多个载荷增量，且总是需要平衡迭代，它不同于线性求解。处理过程如下：

- 1、进入 ANSYS 求解器

命令：/Solution

GUI：Main Menu>Solution

- 2、定义分析类型及分析选项。分析类型和分析选项在第一个载荷步后（也就是，在你发出你的第一个 SOLVL 命令之后）不能被改变。ANSYS 提供这些选项用于静态分析。

表 1—1 分析类型和分析选项

Option	Command	GUI Path
New Analysis	ANTYPE	Main Menu>Solution>--Analysis Type--New Analysis/Restart
Analysis Type: Static	ANTYPE	Main Menu>Solution>--Analysis Type -New Analysis>Static
Large Deformation Effects	NLGEOM	Main Menu>Solution>Analysis Options
Stress Stiffening Effects	SSTIF	Main Menu>Solution>Analysis Options
Newton-Raphson Option	NROPT	Main Menu>Solution>Analysis Options
Equation Solver	EQSLV	Main Menu>Solution>Analysis Options

这些选项中的每一个都将在下面详细地解释。

选项：新的分析（ANTYPE）

一般情况下会使用 New Analysis(新的分析)。

选项：分析类型：静态（ANTYPE）

选择 Static（静态）。

选项：大变形或大应变选项（GEOM）

并不是所有的非线性分析都将产生大变形。参看：“使用几何非线性”对大变型的进一步讨论。

选项：应力刚化效应（SSTIF）

如果存在应力刚化效应选择 ON。

选项：牛顿—拉普森选项（NROPT）

仅在非线性分析中使用这个选项。这个选项指定在求解期间每隔多久修改一次正切矩阵。你可以指定这些值中的一个。

- 程序选择 (NROPT, ANTO): 程序基于你模型中存在的非线性种类选择用这些选项中的一个。在需要时牛顿-拉普森方法将自动激活自适应下降。
- 全 (NROPT, FNLL): 程序使用完全的牛顿-拉普森处理方法, 在这种处理方法中每进行一次平衡迭代修改刚度矩阵一次。如果自适应下降是关闭的, 程序每一次平衡迭代都使用正切刚度矩阵。(我们一般不建议关闭自适应下降, 但是你或许发现这样做可能更有效。)如果自适应下降是打开的(缺省), 只要迭代保持稳定(也就是, 只要残余项减小, 且没有负主对角线出现)程序将仅使用正切刚度矩阵。如果在一次迭代中探测到发散倾向, 程序抛弃发散的迭代且重新开始求解, 应用正切和正割刚度矩阵的加权组合。当迭代回到收敛模式时, 程序将重新开始使用正切刚度矩阵。对复杂的非线性问题自适应下降通常将提高程序获得收敛的能力。
- 修正的 (NROPT, MODI): 程序使用修正的牛顿-拉普森方法, 在这种方法中正切刚度矩阵在每一子步中都被修正。在一个子步的平衡迭代期间矩阵不被改变。这个选项不适用于大变形分析。自适应下降是不可用的。
- 初始刚度 (NROPT, INIT): 程序在每一次平衡迭代中都使用初始刚度矩阵这一选项比完全选项似乎较不易发散, 但它经常要求更多次的迭代来得到收敛。它不适用于大变形分析。自适应下降是不可用的。

选项: 方程求解器

对于非线性分析, 使用前面的求解器(缺省选项)。

3、在模型上加载, 记住在大变形分析中惯性力和点载荷将保持恒定的方向, 但表面力将“跟随”结构而变化。

4、指定载荷步选项。这些选项可以在任何载荷步中改变。下列选项对非线性静态分析是可用的:

普通选项

普通选项包括下列:

- Time(TIME)

ANSYS 程序借助在每一个载荷步末端给定的 TIME 参数识别出载荷步和子步。使用 TIME 命令来定义受某些实际物理量(如先后时间, 所施加的压力, 等等。)限制的 TIME 值。

程序通过这个选项来指定载荷步的末端时间。

注意——在没有指定 TIME 值时, 程序将依据缺省自动地对每一个载荷步按 1.0 增加 TIME (在第一个载荷步的末端以 TIME=1.0 开始)。

- 时间步的数目 (NSUBST)
- 时间步长 (DELTIM)

非线性分析要求在每一个载荷步内有多个子步(或时间步; 这两个术语是等效的)从而 ANSYS 可以逐渐施加所给定的载荷, 得到精确的解。NSUBST 和 DELTIM 命令都获得同样的效果(给定载荷步的起始, 最小, 及最大步长)。NSUBST 定义在一个载荷步内将被使用的子步的数目, 而 DELTIM 明确地定义时间步长。如果自动时间步长是关闭的, 那么起始子步长用于整个载荷步。缺省时是每个载荷步有一个子步。

- 渐进式或阶跃式的加载

在与应变率无关的材料行为的非线性静态分析中通常不需要指定这个选项, 因为依据缺省, 载荷将为渐进式的阶跃式的载荷 (KBC, 1) 除了在率-相关材料行为状况下(蠕变或粘塑性), 在静态分析中通常没有意义。

- 自动时间分步 (AUTOTS)

这一选项允许程序确定子步间载荷增量的大小和决定在求解期间是增加还是减小时间步(子步)长。缺省时是 OFF(关闭)。

你可以用 AUTOTS 命令打开自动时间步长和二分法。通过激活自动时间步长, 可以让程序决定在每一个载荷步内使用多少个时间步。

在一个时间步的求解完成后, 下一个时间步长的大小基于四种因素预计:

- 在最近过去的时间步中使用的平衡迭代的数目(更多次的迭代成为时间步长减小的原因)
- 对非线性单元状态改变预测(当状态改变临近时减小时间步长)

- 塑性应变增加的大小
- 蠕变增加的大小

非线性选项

程序将连续进行平衡迭代直到满足收敛准则（或者直到达到允许的平衡迭代的 最大数〔NEQIT〕）。我们可以用缺省的收敛准则，也可以自己定义收敛准则。

- 收敛准则〔CNVTOL〕

缺省的收敛准则

依据缺省，程序将以 VALUE * TOLER 的值对力（或者力矩）进行收敛检查。VALUE 的缺省值是在所加载荷（或所加位移，Newton-Raphson 回复力）的 SRSS，和 MINREF（其缺省为 1.0）中，取值较大者。TOLER 的缺省值是 0.001

你应当几乎总是使用力收敛检查。可以添加位移（或者转动）收敛检查。对于位移，程序将收敛检查建立在当前（i）和前面（i-1）次迭代之间的位移改变上。

注意——如果你明确地定义了任何收敛准则〔CNVTOL〕，缺省准则将“失效”。因此，如果你定义了位移收敛检查，你将不得不再定义力收敛检查（使用多个 CNVTOL 命令来定义多个收敛准则）。

用户收敛准则

你可以定义用户收敛准则，替代缺省的值。

使用严格的收敛准则将提高你的结果的精度，但以多更次的平衡迭代为代价。如果你想严格（加放松）你的准则，你应当改变 TOLER 两个数量级。一般地，你应当继续使用 VALUE 的缺省值；也就是，通过调整 TOLER，而不是 VALUL 改变收敛准则。你应当确保 MINREF=1.0 的缺省值在你的分析范围内有意义。

在单一和多 DOF 系统中检查收敛

要在单自由度（DOF）系统中检查收敛，你对这一个 DOF 计算出不平衡力，然后对照给定的收敛准则（VALUE*TOLER）参看这个值（同样也可以对单一 DOF 的位移和旋度）收敛进行类似的检查。）然而，在多 DOF 系统中，你也许想使用不同的比较方法。

ANSYS 程序提供三种不同的矢量规范用于收敛检查。

- 无限规范在你模型中的每一个 DOF 处重复单一 DOF 核查。
- LI 规范将收敛准则同所有 DOFS 的不平衡力（力矩）的绝对值的总和相对照。
- L2 规范使用所有 DOFS 不平衡力（或力矩）的平方总和的平方根进行收敛检查。

实例

对于下面例子，如果不平衡力（在每一个 DOF 处单独检查）小于或等于 $5000 \cdot 0.0005$ （也就是 2.5），且如果位移的改变（以平方和的平方根检查）小于或等于 $10 \cdot 0.001$ （也就是 0.01），子步将认为是收敛的。

CNVTOL, F, 5000, 0.005, 0

CNVTOL, U, 10, 0.001, 2

- 平衡迭代的最大次数〔NEQIT〕

使用这个选项来对在每一个子步中进行的最大平衡迭代次数实行限制（缺省=25）。如果在这个平衡迭代次数之内不能满足收敛准则，且如果自动步长是打开的〔AUTOTS〕，分析将尝试使用二分法。如果二分法是不可能的，那么，分析将或者终止，或者进行下一个载荷步，依据你在 NCNV 命令中发出的指示。

- 求解终止选项〔NCNV〕

这个选项处理五种不同的终止准则：

- 如果位移“太大”它建立一个用于终止分析和程序执行的准则。
- 它对累积迭代次数设置限制。
- 它对整个时间设置限制。
- 它对整个 CPU 时间设置限制。
- 弧长选项〔ARCLEN〕

如果你预料结构在它的载荷历史内在某些点将变得物理意义上不稳定（也就是，结构的载荷—位移曲线的斜度将为 0 或负值），你可以使用弧长方法来帮助稳定数值求解。

AA

激活弧长方法的典型的系列命令显示在这里:

注意——当合适时,你可以和弧长方法一起使用许多其它的分析和载荷步选项。然而,你不
应和弧长方法一起使用下列选项: 不要使用线搜索 (LNSRCH), 时间步长预测 (PRED),
自适应下降 (NROPT), (ON), 自动时间步长 (AUTOTS, TIME, DELTIM), 或打开时间
-积分效应 (TIMINT)。

- 时间步长预测——纠正选项 (PRED)

对于每一个子步的第一次平衡迭代你可以激活和 DOF 求解有关的预测。这个特点加速收敛且如果非线性响应是相对平滑的, 它特别的有用。在包含大转动或粘弹 的分析中它并不是非常有用。

- 线搜索选项 (LNSRCH)

这个选项是对自适应下降的替代。当被激活时, 无论何时发现硬化响应。这个收敛提高工具用程序计算出的比例因子 (具有 0 和 1 之间的值) 乘以计算出的位移增量。因为线搜索算法是用来对自适应下降选项 (NROPT) 进行的替代, 如果线搜索选项是开, 自适应下降不被自动激活。不建议你同时激活线搜索和自适应下降。

当存在强迫位移时, 直到迭代中至少有一次具有一个的线搜索值运算才会收敛。ANSYS 调节整个 DU 矢量, 包括强迫位移值; 否则, 除了强迫 DOF 处一个小的位移值将随处发生。直到迭代中的某一次具有 1 的线搜索值, ANSYS 才施加全部位移值。

- 蠕变准则 (CRPLIM, CPCR)

如果结构表现出蠕变行为, 可以指定蠕变准则用于自动时间步调整。(如果自动时间步长 (AUTOTS) 不是打开的, 这个蠕变准则将无效。) 程序将对所有单元计算蠕应变增量 (在最近时间步中蠕变的变化) 对弹性应变的比值。如果最大比值比判据大, 程序将减小下一个时间步长; 如果小, 程序或许增加下一个时间步长。(同样地程序将把自动时间步长建立在平衡迭代次数, 即将发生的单元状态改变, 以及塑性应变增量的基础上。时间步长将被调整到对应这些项目中的任何一个所计算出的最小值。) 如果比值高于 0.25 的稳定界限, 且如果时间增量不能被减小, 解可能发散且分析将由于错误信息而终止。这个问题可以通过使最小时间步长足够小避免 (DELTIM, NSUBST)。

- 激活和杀死选项

在 ANSYS/Mechanical 和 ANSYS/LS-DYNA 产品中, 你可以去杀死和激活单元来模拟材料的消去和添加。

程序通过用一个非常小的数 (它由 ESTIF 命令设置) 乘以它的刚度从总质量矩阵消去它的质量 “杀死” 一个单元。对无活性单元的单元载荷 (压力, 热通量, 热应变, 等等) 同样地设置为零。你需要在前处理中定义所有可能的单元; 你不可能在 SOLUTION 中产生新的单元。

要在你的分析的后面阶段中 “出生” 的那些单元, 在第一个载荷步前应当被杀死, 然后去在适当的载荷步的开始被重激活, 当单元被重激活时, 它们具有零 应变状态, 且 (如果 NLGEOM, ON) 它们的几何 (开头长度, 面积等等) 被修改来与它们的现偏移位置相适应。

- 杀死 (EKILL)
- 激活 (EALIVE)
- 改变材料性质参考号 (MPCHG)

另一种在求解期间影响单元行为的办法是来改变它的材料性质参考号。这个选项允许你在载荷步间改变一个单元的材料性质。

EKILL 适用于大多数单元类型。MPCHG 适用于所单元类型。

输出控制选项

输出控制选项包括下列:

- 打印输出 (OUTPR)

使用这个选项来在输出文件 (Jobname.out) 中包括进便所想要的结果数据。

- 结果文件输出 (OUTRES)

这个选项控制结果文件中的数据 (Jobname.rst)。

OUTPR 和 OUTRES 用来控制结果被写入这些文件的频率。

- 结果外推 (ERESX)

这个选项, 依据缺省, 拷贝一个单元的积分点应力和弹性应变结果到结点而替代外推它们, 如果在单元中存在非线性 (塑性, 蠕变, 膨胀) 的话。积分点非线性变化总是被拷贝到结点。

注意: 对输出行使下列警告:

- 恰当使用多个 OUTRES 或 OUTPR 命令有时可能有一点小的技巧。
- 依据缺省, 在非线性分析中只有最后一个子步被写入结果文件。要写入所有子步, 设置 OUTRES 中的 FREQ 域为 ALL。
- 依据缺省, 只有 1000 个结果集 (子步) 可以被写入结果文件。如果超过了这个数目 (基于你的 OUTRES 指定), 程序将由于错误而终止。使用命令 /CONFIG, NRES 来增加这个界限。

5、存储基本数据的备份副本于另一文件。

命令: SAVE

GUI: Utility Menu>File>Save As

6、开始求解计算。

命令: SOLVE

GUI: Main Menu>Solution>-Solve-Current LS

7、如果你需要定义多个载荷步, 对每一个其余的载荷步重复步骤 3 至 6。

8、离开 SOLUTION 处理器

命令: FINISH

GUI: 关闭 Solution 菜单。

步骤 3: 考察结果

来自非线性静态分析的结果主要由位移, 应力, 应变, 以及反作用力组成。可以用 POST1, 通用后处理器, 或者用 POST26, 时间历程后处理器, 来考察这些结果。

记住, 用 POST1 一次仅可以读取一个子步, 且来自那个子步的结果应当已被写入 Jobname.rst。(载荷步选项命令 OUTRES 控制哪一个子步的结果被存储入 Jobname.rst。)典型的 POST1 后处理顺序将在下面描述。

要记住的要点

- 用 POST1 考察结果, 数据库中的模型必须与用于求解计算的模型相同。
- 结果文件 (Jobname.rst) 必须是可用的。

用 POST1 考察结果

1、检查你的输出文件 (Jobname.out) 是否在所有的子步分析都收敛。

- 如果不收敛, 你可能不想后处理结果, 而是想确定为什么收敛失败。
- 如果你的解收敛, 那么继续进行后处理。

2、进入 POST1。如果用于求解的模型现在不在数据中, 发出 RESUME。

命令: POST1

GUI: Main Menu>General Postproc

3、读取需要的载荷步和子步结果, 这可以依据载荷步和子步号或者时间来识别然而, 不能依据时间识别出弧长结果。

命令: SET

GUI: Main Menu>General Postproc>Read Results-Load step

同样地你可以使用 SUBSET 或者 APPEND 命令来只对选出的部分模型读取或者合并结果数据。这些命令中的任何一个中的 LIST 参数列出结果文件中可用的解。你同样地可以通过 INRES 命令限制从结果文件到基本数据被写的的数据总量。另外可以用 ETABLL 命令对选出的单元存进行后处理。

注意: 如果你指定了一个没有结果可用的 Time 值, ANSYS 程序将进行线性内插来计算出那 Time 处的结果。认识到在非线分析中这种线性内插通常将导致某些精度损失 (参看图 1—9)。因此, 对于非线性分析, 通常你应当在一个精确地对应于要求子步的 TIME 处进行后

处理。

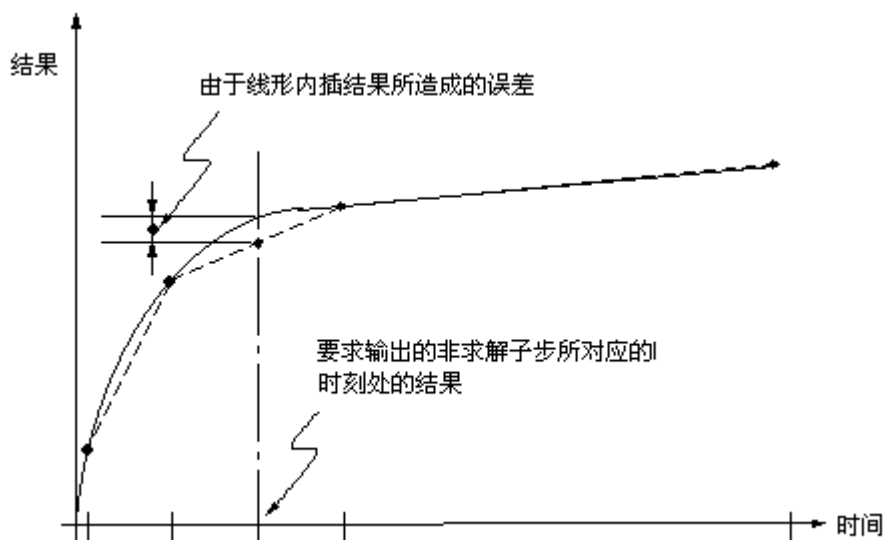


图 1—9 非线性结果的线性内插可能引起某些误差。

4、使用下列任意选项显示结果

选项：显示已变形的形状

命令：PLDISP

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

在大变形分析中，一般优先使用真实比例显示 (IDSCALE,, 1)。

选项：等值线显示

命令：PLNSOL 或者 PLESOL

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

使用这些选项来显示应力，应变，或者任何其它可用项目的等值线。如果邻接的单元具有不同材料行为（可能由于塑性或多线性弹性的材料性质，由于不同的材料类型，或者由于邻近的单元的死活属性不同而产生），你应当注意避免你的结果中的结点应力平均错误。

同样地你可以绘帛单元表数据和线单元数据的等值线：

命令：PLETAB, PLLS

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

Main Menu>General Postproc>Plot Results>-Contour Plot-Line Elem Res

使用 PLETAB 命令（GUI 路径 Main Menu>General Postproc>Element Table>Plot *

Element Table)来绘制单元表数据的等值线，用 PLLS（GUI 路径 Main Menu>General Postproc>Plot Results>Line elem Res）来绘制线单元数据的等值线。

选项：列表

命令：

PRNSOL（结点结果）

PRESOL（结果）

PRRSOL（反作用力数据）

PRETAB

PRITER（子步总计数据）等等。

NSORT

ESORT

GUI: Main Menu>General Postproc>List Results>Nodal Solution

Main Menu>General Postproc>List Results>Element Solution

Main Menu>General Postproc>List Results>Reaction Solution

使用 NSORT 和 ESORT 命令在将数据列表前对它们进行排序。

其它的性能

许多其它的后处理函数——在路径上映射结果。记录，参量列表，等等——在 POST1 中是可用的。对于非线性分析，载荷工况组合通常是无效的。

用 POST26 考察结果

同样地你可以使用 POST26，时间—历程后处理器考察非线性结构的载荷——历程响应。使用 POST26 比较一个 ANSYS 变量对另一个变量的关系。例如，你可以用图形表示某一结点处的位移与对应的所加载荷的关系，或者你可以列出某一结点处的塑性应变和对应的 TIME 值之间的关系。

典型的 POST26 后处理顺序可以遵循以下步骤：

- 1、根据你的输出文件 (Jobname.OUT) 检查是否在所有要求的载荷步内分析都收敛。你不应当将你的设计决策建立在非收敛结果的基础上。
- 2、如果你的解是收敛的，进入 POST26，如果现与你的模型不在数据库内，发出 RESUME 命令。

命令：POST26

GUI：Main Menu>Time Hist Postpro

3、定义在后处理期间使用的变量。

命令：

NSOL

ESOL

RFORCL

GUI：Main Menu>Time Hist Postproc>Define Variables

4、图形或者列表显示变量。

命令：

PLVAR (图形表示变量)

PRVAR

EXTREM (列表变量)

GUI：Main Menu>Time Hist Postprac>Graph Variable S

Main Menu>Time Hist Postproc>List Variables

Main Menu>Time Hist Postproc>List Extremes

其它的性能

许多其它的后处理函数可用于 POST26。

终止正在运行的工作；重启动

你可以通过产生一个“abort”文件 (Jobname.abt) 停止一个非线性分析。一旦求解成功地完成，或者收敛失败发生，程序也将停止分析。

如果一个分析在终止前已成功地完成了一次或多次迭代，你可以屡次重启动它。

非线性静态实例分析（GUI 方法）

在这个实例分析中，你将进行一个子弹冲击刚性壁的非线性分析。

问题描述

一个子弹以给定的速度射向壁面。壁面假定是刚性的和无摩擦的。将研究子弹和壁面接触后达 80 微秒长的现象。目的是确定子弹的整个变形，速度历程，以及最大等效 Von Mises 应变。求解使用 SI 单位。

用轴对称单元模拟棒。求解最好能通过单一载荷步实现。在这个载荷步中，将同时施加初始速度和约束。将圆柱体末端的节点 Y 方向约束住以模拟一固壁面。打开自动时间分步来允许 ANSYS 确定时间步长。定义分析结束的时间为 8E-5 秒，以确保有足够长的时间来扑捉整个变形过程。

问题详细说明

下列材料性质应用于这个问题：

EX=117.0E09 （杨氏模量）

DENS=8930.0 （密度）

NUXY=0.35 （泊松比）

Yield Strength=400.0E06 （屈服强度）

Tangent Modulus （剪切模量）

下列尺寸应用于这个问题：

长=32.4E-3m

直径=6.4E-3m

对于这个问题的初始速度是 227.0。

问题的草图

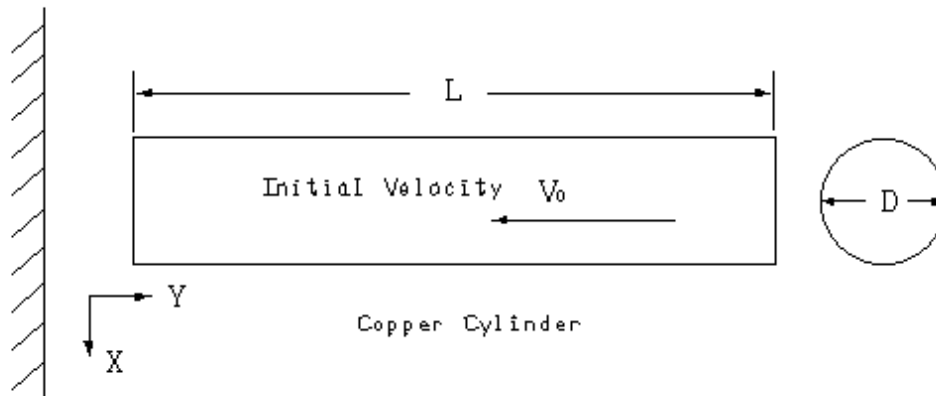


图 1—10 铜圆柱体图解

求解步骤：

步骤一：设置分析标题

- 1、选择菜单路径：Utility Menu>File>ChangeTitle。
- 2、键入文字 “Copper Cylinder Impacting a Rigid Wall”
- 3、单击 OK。

步骤二：定义单元类型

- 1、选择菜单路径 Main Menu>Preprocessor>Element Type>All/Edit/Delete。
- 2、单击 Add。Library of Element Types(单元类型库)对话框出现。
- 3、在靠近左边的列表中，单击 “Axis Solid” 仅一次。
- 4、选靠近右边的列表中，单击 “4node Axis 106” 仅一次。
- 5、单击 OK。Library of Element Types 对话框关闭。

6、单击 Options (选项)。VISCO106 element type Options(visco106 单元类型选项) 对话框出现。

7、在关于 element behavior (单元特性) 的卷动框中, 卷动到 “Axisymmetric” 且选中它。

8、单击 OK。

9、单击 Element Types (单元类型) 对话框中的 Close。

步骤三: 定义材料性质

1、选择菜单路径 Main Menu>Preprocessor>Material Props>-Constant-Isotropic. Isotropic Material Properties (各向同性材料性质) 对话框出现。

2、单击 OK 来指定材料号为 1。另一个 Isotropic Material Properties 对话框出现。

3、对杨氏模量 (EX) 键入 117.0E09

4、对密度 (DENS) 键入 8930。

5、对泊松比 (NUXY) 键入 0.35。

6、单击 OK。

步骤四: 定义双线性各向同性强化数据表 (BISO)

1、选择菜单路径 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Data Tables>Define/Activate. Define/Activate Data Table(定义数据表) 对话框出现。

2、在关于 type of data table(数据表类型) 的卷动框中, 卷动到 “Bilin isotr BISO” 且选中它。

3、对 material reference number(材料参考号) 键入 1。

4、对 number of temperatures(温度数) 键入 1 和单击 OK。

5、选择菜单路径 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Data Tables>Edit Active. Data Table BISO 对话框出现。

6、对 YLD Strs(屈服应力) 键入 400.0e06。

7、对 Tang Mod(剪切模量) 键入 100.0e06。

8、选择 File>Apply & Quit。

9、选择菜单路径 Main Menu>Preprocessor>Material Props>Data Tables>Graph. Graph Data Tables(图形表示数据表) 对话框出现。

10、单击 OK 接受绘制 BISO 表的缺省。一个 BISO 表的标绘图出现在 ANSYS 图形窗口中。

11、在 ANSYS Toolbar 上单击 SAVE_DB。

步骤五: 产生矩形

在这一步中, 你产生一个代表柱体半横截面积的矩形。

1、选择菜单路径 Main Menu>Preprocessor>-Modeling>Create>-Area-Rectangle>By Dimensions. Create Rectanyle by Dimensions(依据尺寸产生矩形) 对话框出现。

2、对 X_坐标键入 0, .0032。

3、对 Y_坐标键入 0, .0324 然后单击 OK。一个矩形出现在 ANSYS 图形窗口中。

4、选择菜单路径 Utility Menu>Plot>lines。

步骤六: 设置单元尺寸

1、选择菜单路径 Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Shape&Size>-Lines-Picked Lines. Element Size On Picked Lines(关于挑选出的线的单元尺寸) 选择菜单出现。

2、在长线中的一条上单击一次然后单击 OK。Element Sizes on Picked Lines 对话框出现。

3、对 number of element divisions (单元划分的数目) 键入 20 然后单击 OK。

4、重复步骤 1 和 2, 但这次选择短线中的一条。

5、对 number of element divisions 键入 4 然后单击 OK。

步骤七: 设置网格单元形状且对矩形划分网格

1、选择菜单路径 Main Menu>Preprocessor>-Mesh Tool

2、选择 “quad” 和 “Map”, 然后单击 “Mesh”

3、在拾取菜单出现后, 选择面, 然后单击 “OK”

4、在 ANSYS Toolbar 上单击 SAVE_DB。

5、选择菜单路径 Main Menu>Preprocessor>-Meshing-Mesh>-Area-Mapped>3 or 4 Sided.

Mesh Areas(对面积划分网格) 选择菜单出现。

6、单击 Pick All。

7、单击 ANSYS Toolbar 上的 SAVE_DB。

步骤八：定义分析类型和选项

1、选择菜单路径 Main Menu>Solution>-Analysis Type-New Analysis。

2、单击 “Transient” 来选中它然后单击 OK。

3、选择菜单路径 Main Menu>Solution>Analysis Options.Transient Analysis (瞬态过程分析) 对话框出现。

4、单击 OK 接受完全求解方法的缺省。Full Transient Analysis 对话框出现。

5、单击 Large deform effects option(大变型效应选项) 使之为 ON (开) 状态然后单击 OK。

步骤九：定义弹的初始速度

1、选择菜单路径 Main Menu>Solution>-Loads-Apply>Initial Condit'n>Define. Define Initial Condition(定义初始条件) 选择菜单出现。

2、单击 Pick All. Define Initial Conditions 对话框出现。

3、在关于 DOF to be Specified(要被指定的 DOF) 的卷动框中，卷动到 “UY” 且选中它。

4、对 initial velocity(初始速度) 键入 -227 然后单击 OK。

5、单击 ANSYS Toolbar 上的 SAVE_DB。

步骤十：施加约束

1、选择菜单路径 Main Menu>Solution>-Loads-Apply>-Structural-Displacement> On Nodes.Apply. U,ROT on Nodes 选择菜单出现。

2、单击 Pick All., Apply U, ROT on Nodes 对话框出现。

3、对于 DOFs to be Constrained (要被约束的 DOFs) 单击 “UY”，然后单击 Apply。

4、在选择菜单中，单击 “BOX” 作为选择方法。

5、当你拖鼠标沿 X=0.1 的结点周围 (沿矩形左边的第一个结点集) 形成一个矩形框时要按下且保持鼠标左键。

6、单击 Apply。

7、在对话框中，对于 DOFs to be constrained 单击 “UX”。你需要单击 “UY” 一次以去除它。

8、单击 Apply。

9、在选择菜单中，单击 “BOX” 选择方法。

10、当你拖鼠标沿 Y=0 的结点周围 (沿矩形底边的第一个结点集) 形成一个矩形框时按下且保持鼠标左键。

11、单击 OK。

12、在对话框中，单击 “UY” 来选中它，你需要单击 “UX” 仅一次来淘汰它。

13、单击 OK。现在在 ANSYS 图形窗口中位移符号沿矩形的左边和底边产生。

步骤十一：设置载荷步选项

1、选择菜单路径 Main Menu>Solution>-Load Step Options-Time/Frequenc> time&Time Step. Time&Time Step Option(时间和时间步选项) 对话框出现。

2、对 time at end of Load Step(载荷步终止时间) 键入 8e-5。

3、对 time step size (时间步长) 键入 4.4e-7。

4、单击 “Stepped” 来选中它。

5、单击 automatic time stepping option (自动时间分步选项) 使之为 ON (开) 状态然后单击 OK。

6、选择菜单路径 Main Menu>Solution>-Load Step Options-Output Ctrl> DB/Results File. Controls for Database and Results File Writing (对数据库和结果文件写入的控制) 对话框出现。

7、单击 “Every Nth substep” (“每隔 N 个子步”) 且选中它。

8、对于 Value of N (N 的值) 键入 4 然后单击 OK。

9、单击 ANSTS Toolbar 上的 SAVE_DB。

步骤十二：求解问题

- 1、选择菜单路径 Main Menu>Solution>-Solve-Current LS。
- 2、检阅状态窗口中的信息然后单击 close。
- 3、单击 Solve Current Load Step(求解当前载荷步) 对话框中的 OK 开始求解。
- 4、当求解完成时单击 close。

步骤十三：确定柱体的应变

- 1、选择菜单路径 Main Menu>General Postproc>-Read Results-Last Set。
- 2、选择菜单路径 Utility Menu>Parameters>Stalar Paramenters。
- 3、在选择框中键入 TOP_NODE=26。
- 4、单击 Accept, 然后单击 close。
- 5、选择菜单路径 Utility Menu>Parameters>Get Scalar Data。
- 6、在靠近在边的框中, 单击 “Results data”。
- 7、在靠近右边的框中, 单击 “Nodal results” 然后单击 OK。Get Nodal Results Data(获取结点结果数据) 对话框出现。
- 8、对于 name of parameter to be defnsned(要定义的参数名) 键入 DEFORM。
- 9、对于 Node number N (结点号 N) 键入 TOP_NODE。
- 10、在靠近右边的卷动框中, 单击 “UY”, 然后单击 OK。
- 11、选择菜单路径 Utility Menu>List>Other>Parameters。
- 12、检阅状态窗口中的信息, 弹的长度上的变化基准 (DEKORM) 是-0101091。
- 13、单击 close。

步骤十四：图形表示已变形的形状和绘制等效总应变的等值线。

- 1、选择菜单路径 Utility Menu>Plotctrls>Style>Displacement Scaling. Displacement. Display Scaling(位移显示比例) 对话框出现。
- 2、单击 1.0 (true stale)来选中它然后单击 OK。
- 3、在 ANSYS 输入窗口中, 键入 D2SCALE, 1, 1 然后按 ENTER 键。
- 4、选择菜单路径 Main Menn>General Postproc>Plot Results>Deformed Shape. Plot Deformed Shape(图示已变形的形状) 对话框出现。
- 5、单击 “Def+undef edge” 以选中它然后单击 OK。
- 6、选择菜单路径 Main Menu>General Postproc>Plot Results>-Contour Plot-Nodal Solu. Contour Nodal Solution Data(绘制结点解数据的等值线出现)。
- 7、在靠近左边的框中, 单击 “Strain-total”。
- 8、在靠近右边的框中, 卷动到 “Von Mises EPTOEQV” 然后选中它。
- 9、单击 OK。

步骤十五：进入 POST26 然后定义一个变量。

在这一步中, 你进入时间一历程后处理器然后定义一个变量来存储沿弹顶边的一个结点的变形。

- 1、选择菜单路径 Main Menu>Time Hist Postproc>Define Variables. Defined. Time-History Variables(定义时间一历程变量) 对话框出现。
- 2、单击 Add.Add Time-History Variable (添加时间一历程变量) 对话框出现。
- 3、单击 OK 以接受结点的 DOF 结果的缺省。Define Nodal Data(定义结点数据) 对话框出现。
- 4、对 reference number of rariable(变量的参考号) 键入 2。
- 5、对 node number (结点号) 键入 TOP_NODE。
- 6、对 user-specified lobel(用户指定的标签) 键入 DISPLACE。
- 7、对于 Item, Comp Data 项目单击 “UY”。
- 8、单击 OK, 然后单击 close。

步骤十六：计算结点 TOP—NODE 处随时间变化的速度且用图表示。

- 1、选择菜单路径 Main Menu>Tiome Hist Postpro>Math Operations>Derivative. Derivative of

- Time-History Variables (时间—历程变量的从变量) 对话框出现。
- 2、对 reference number for result (结果的参考号) 键入 3。
 - 3、对第一个变量键入 2、对第二个变量 3 键入 1。
 - 4、对 user-specified label(用户指定的标签) 键入 VELOCITY, 然后单击 OK。
 - 5、选择菜单路径 Utility Menu>Plot(>Style>Graphs.Graph Controls(图形控制) 对话框出现。
 - 6、对 Y_axis Label 键入 VELOCITY 然后单击 OK。
 - 7、选择菜单路径 Main Menu>Time Hist Postpro>Graph Variables. Graph Time-History Variables(图形表示时间—历程变量) 对话框出现。
 - 8、对于 1st variable to graph 键入了然后单击 OK。图形出现在 ANSYS 图形窗口中。

步骤十七: 退出 ANSYS

- 1、从 ANSYS Toolbar 选择 QUIT。
- 2、单击你想要的存储选项, 然后单击 OK。

非线性静态实例分析 (命令或批处理方式)

你可以用下面显示的 ANSYS 命令替代 GUI 选择进行铜柱体冲击刚性壁的非线性静态实例分析。以叹号 (!) 开头的条目是注释。

```
fini
/cle
/title,copper cylinder impacting a rigid wall
/prep7
et,1,visco106
keyopt,1,3,1
mp,ex,1,117e9
mp,dens,1,8930
mp,nuxy,1,0.35
tb,biso,1,1,,0
tbmodif,2,1,4e8
tbmodif,3,1,1e8
tbplot,biso,1
rectng,0,0.0032,0,0.0324
lesize,2,,,20,1
lesize,1,,,4,1
mshape,0,2d
mshkey,1
amesh,1
fini
/solu
antype,4
trnopt,full
lumpm,o
nlgeom,1
ic,all,uy,-227
d,all,,0,,,uz
nsel,s,loc,x,0
d,all,,0,,,ux
nsel,s,loc,y,0
d,all,,0,,,uy
allsel
time,8e-5
autots,1
```

```
deltim,4.4e-7
kbc,1
outres,all,4
solve
fini
/post1
set,last
top_node=26
*get,deform,node,top_node,u,y
/dscale,1,1
pldisp,2
plnsol,ept,eqv
fini
/post26
nsol,2,top_node,u,y,displace
deriv,3,2,1,,velocity,,,1
/axlab,y,velocity
plvar,3
fini
```

其它例子

ANSYS Verification Manual, 描述了一些另外的非线性分析实例。下表显示给你一些 Verification Manual 包括的非线性分析例子:

VM7 管组装的塑性压缩
VM11 残余应力问题
VM24 矩形梁的塑性
VM38 受压厚壁柱体的塑性加载
VM56 内部受压的超弹性厚柱体
VM78 悬臂梁中的横向剪切应力
VM80 对突然施加恒力的塑性响应
VM104 液-固相变
VM124 蓄水池中水的排出
VM126 流动流体的热传导
VM132 由于蠕变螺栓的应力消除
VM133 由于辐射感应蠕变棒的应力
VM134 一端固定梁的塑性弯曲
VM146 钢盘混凝土梁的弯曲
VM165 铁性导体的载流
VM198 面内扭转实验的大应变
VM199 承受剪切变形的物体的粘弹性分析
VM200 粘弹性的叠层密封分析