

第七章 优化技术

本章要点:

- | 优化设计的基本概念, 主要步骤
- | 常用优化技术及每种技术的适用范围
- | 如何执行实际的优化分析任务
- | 拓扑优化的基本概念, 主要步骤
- | 拓扑优化的优化区域选择问题
- | 如何执行实际的拓扑优化分析

学好、用好 ANSYS 的优化功能, 需要首先从优化的基础知识开始了解, 然后在补充专业内容的同时, 加强实际操作练习, 提高解决实际优化问题的能力。下面首先从优化设计的基础知识开始介绍。

7.1 优化设计

7.1.1 优化设计基本概念

优化设计是一种寻找最优设计方案的技术。所谓“最优设计”, 指的是一种方案可以满足所有的设计要求, 而且所需的支出(如重量, 面积, 体积, 应力, 费用等)最小。也就是说, 最优设计方案就是一个最有效率的方案。

设计方案的任何方面都是可以优化的, 如结构的尺寸(如厚度、高度、宽度等)、形状(如过渡圆角的大小)、支撑位置、制造费用、自然频率、材料特性等。实际上, 所有可以参数化的 ANSYS 选项都可以作优化设计。

ANSYS 程序提供了两种优化的方法, 即零阶法和一阶法, 这两种方法可以处理绝大多数的优化问题。零阶法是一个很完善的处理方法, 可以很有效地处理大多数的工程问题。一阶法基于目标函数对设计变量的敏感程度, 因此更加适合于精确的优化分析。

对于这两种方法, ANSYS 程序提供了一系列的分析——评估——修正的循环过程。就是对于初始设计进行分析, 对分析结果就设计要求进行评估, 然后修正设计。这一循环过程重复进行直到所有的设计要求都满足为止。

除了这两种优化方法, ANSYS 程序还提供了一系列的优化工具以提高优化过程的效率。例如, 随机优化分析的迭代次数是可以指定的。随机计算结果的初始值可以作为优化过程的起点数值。下面介绍进行优化设计时常用的基本概念。

在介绍优化设计过程之前, 首先需要了解以下基本概念: 设计变量, 状态变量, 目标函数, 合理和不合理的设计, 分析文件, 迭代, 循环, 设计序列等。下面是通过一个典型的优化设计问题结束上述概念:

Ø 约束条件:

总应力 σ 不超过 $\sigma_{\max}$ ($\sigma \leq \sigma_{\max}$)

梁的变形 δ 不超过 $\delta_{\max}$ ($\delta \leq \delta_{\max}$)

梁的高度 h 不超过 $h_{\max}$ ($h \leq h_{\max}$)

Ø 优化目标: 在上述条件的约束下获得矩形截面梁的最小重量。

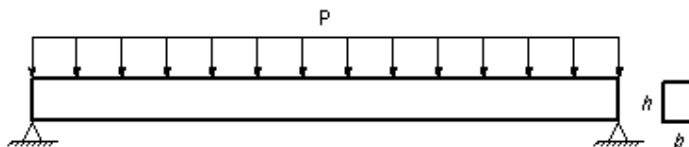


图 7-1 简支梁的优化设计示例

1. 设计变量 (DVs)

设计变量 (DVs) 为自变量, 优化结果的取得就是通过改变设计变量的数值来实现的。每个设计变量都有上下限, 它定义了设计变量的变化范围。在以上的问题里, 设计变量很显然为梁的宽度 b 和高度 h 。 b 和 h 都不可能为负值, 因此其下限应为 $b, h > 0$, 而且, h 有上限 $h_{\max}$ 。 ANSYS 优化程序允许定义不超过 60 个设计变量。

2. 状态变量 (SVs)

状态变量 (SVs) 是约束设计的数值。它们是“因变量”, 是设计变量的函数。状态变量可能会有上下限, 也可能只有单方面的限制, 即只有上限或只有下限。在上述梁问题中, 有两个状态变量: σ (总应力) 和 δ (梁的位移)。在 ANSYS 优化程序中用户可以定义不超过 100 个状态变量。

3. 目标函数

目标函数是要尽量减小的数值。它必须是设计变量的函数, 也就是说, 改变设计变量的数值将改变目标函数的数值。在以上的问题中, 梁的总重量应该是目标函数。在 ANSYS 优化程序中, 只能设定一个目标函数。

设计变量, 状态变量和目标函数总称为优化变量。在 ANSYS 优化中, 这些变量是由用户定义的参数来指定的。用户必须指出在参数集中哪些是设计变量, 哪些是状态变量, 哪是目标函数。

4. 设计序列

设计序列是指确定一个特定模型的参数的集合。一般来说, 设计序列是由优化变量的数值来确定的, 但所有的模型参数 (包括不是优化变量的参数) 组成了一个设计序列。

一个合理的设计是指满足所有给定的约束条件 (设计变量的约束和状态变量的约束) 的设计。如果其中任一约束条件不被满足, 设计就被认为是不合理的。而最优设计是既满足所有的约束条件又能得到最小目标函数值的设计。如果所有的设计序列都是不合理的, 那么最优设计是最接近于合理的设计, 而不考虑目标函数的数值。

5. 分析文件

分析文件是一个 ANSYS 的命令流输入文件，包括一个完整的分析过程（前处理，求解，后处理）。它必须包含一个参数化的模型，用参数定义模型并指出设计变量，状态变量和目标函数。由这个文件可以自动生成优化循环文件（Jobname.LOOP），并在优化计算中循环处理。一次循环指一个分析周期。（可以理解为执行一次分析文件。）最后一次循环的输出存储在文件 Jobname.OPO 中。优化迭代（或仅仅是迭代过程）是产生新的设计序列的一次或多次分析循环。一般来说，一次迭代等同于一次循环。但对于一阶法，一次迭代代表多次循环。

6. 优化数据库

优化数据库记录当前的优化环境，包括优化变量定义，参数，所有优化设定，和设计序列集合。该数据库可以存储（在文件 Jobname.OPT），也可以随时读入优化处理器中。

上述的许多概念可以用图解帮助理解。图 7-2 显示出了优化分析中的数据流向。分析文件必须作为一个单独的实体存在，优化数据库不是 ANSYS 模型数据库的一部分。

7.1.2 优化设计的主要步骤

ANSYS 优化设计提供了两种方法实现优化：批处理方法和 GUI 交互式方法。这两种方法的选择取决于用户对于 ANSYS 程序的熟悉程度和是否习惯于图形交互方式。

如果对于 ANSYS 程序的命令相当熟悉，就可以选择用命令输入整个优化文件并通过批处理方式来进行优化。对于复杂的需用大量计算时间的分析任务来说（如非线性优化），这种方法更有效率。

而另一方面，交互方式具有更大的灵活性，而且可以实时看到循环过程的结果。在用 GUI 方式进行优化时，首要的是要建立模型的分析文件，然后优化处理器所提供的功能都可以交互式的使用，以确定设计空间，便于后续优化处理的进行。这些初期交互式的操作可以帮助用户缩小设计空间的大小，使优化过程得到更高的效率。

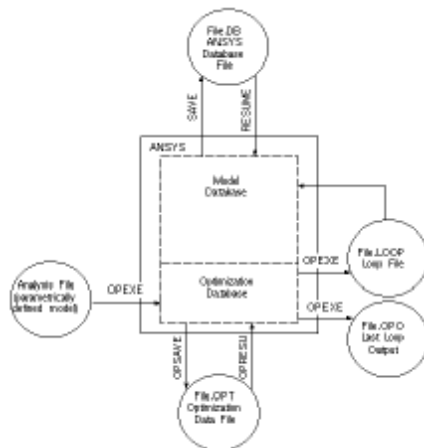


图 7-2 优化数据流向

优化设计通常包括以下几个步骤，这些步骤根据用户所选用优化方法的不同（命令流方

式和 GUI 方式) 而有细微的差别:

(1) 生成循环所用的分析文件

该文件必须包括整个分析的过程, 而且必须满足: 参数化建立模型 (PREP7), 求解 (SOLUTION) 提取并指定状态变量和目标函数 (POST1/POST26)。

(2) 设定参数变量

在 ANSYS 数据库里建立与分析文件中变量相对应的参数。这一步是标准的做法, 但不是必须的 (BEGIN 或 OPT)。

(3) 进入 OPT, 指定分析文件 (OPT)

(4) 声明优化变量

(5) 选择优化工具或优化方法

(6) 指定优化循环控制方式

(7) 进行优化分析

(8) 查看设计序列结果 (OPT) 和后处理 (POST1/POST26)

优化设计步骤的细节在下面列出。批处理方式和交互方式的区别也同时指出。下面根据梁的优化问题进行讲解:

1. 生成分析文件

生成分析文件是 ANSYS 优化设计过程中的关键部分。ANSYS 程序运用分析文件构造循环文件, 进行循环分析。分析文件中可以包括 ANSYS 提供的任意分析类型 (结构, 热, 电磁等, 线性或非线性)。

注意:

ANSYS/LS-DYNA 的显式分析不能进行优化。

在分析文件中, 模型的建立必须是参数化的 (通常是优化变量为参数), 结果也必须用参数来提取 (包括状态变量和目标函数)。优化设计中只能使用数值参数。

用户的任务是建立分析文件并保证其正确性。分析文件应当覆盖整个分析过程并且是简练的, 非必要的语句 (如完成图形显示功能和列表功能的语句等) 应当从分析文件中省略掉。只有在交互过程中希望看到的显示 (EPLDIT 等) 可以包含在分析文件中, 或者将其定位到一个显示文件中 (/SHOW)。

注意:

分析文件是要多次执行的, 与优化分析本身无关的命令都会不必要的耗费计算时间, 降低循环效率。

建立分析文件有两种方法, 一种是用系统编辑器逐行输入命令, 另外一种借助 GUI 操作完成分析, 以 LOG 文件作为基础生成分析文件。

用系统编辑器生成分析文件与生成其他分析时的命令流文件的方法一样, 它使得用户可以通过命令输入来完全地控制参数, 省去了删除多余命令的麻烦。但是对于那些不熟悉 ANSYS 命令集的用户, 采用交互方式进行优化相对容易一些, 只是在最后生成分析文件的过程中, ANSYS 的 LOG 文件要做较大的修改才能适合循环分析。

不论采用哪种方法, 分析文件需要包括的内容都是一样的。以下说明生成分析文件的步骤:

1. 建立参数化模型

建立参数化模型就是用设计变量作为参数建立实体模型。对于梁的重量优化问题而言，设计变量是 B （梁的宽度）和 H （梁的高度），因此单元的实常数由 B 和 H 来表示的：

```
...
/PREP7
!初始化设计变量:
B=2.0
H=3.0
!定义实常数
ET, 1, BEAM3           !2-D梁单元
*set, AREA=B*H         !梁的横截面面积
*set, IZZ= (B* (H**3) ) /12 !绕Z轴的转动惯量
R, 1, AREA, IZZ, H      !以设计变量表示的单元实参
MP, EX, 1, 30E6         !定义弹性模量
N, 1                    !结点
N, 11, 120
FILL
E, 1, 2                 !单元
EGEN, 10, 1, -1
FINISH                  !退出PREP7
...
```

前面提到，借助 ANSYS 可以对设计的任何方面进行优化，如尺寸、形状、材料性质、支撑位置、所加载荷等，唯一要求就是将其参数化。

设计变量（如 B 和 V ）可以在程序的任何部分初始化，一般是在 PREP7 中定义。这些变量的初值只是在设计计算的开始用得到，在优化循环过程中会被改变。

注意：

如果用 GUI 模式完成输入，可能会遇到直接用鼠标拾取（picking）的操作。有些拾取操作是不允许参数化输入的因此，应当避免在定义设计变量，状态变量和目标函数时使用这些操作，应该用可以参数化的操作来代替。如果用户对参数化定义不是很熟悉，可以使用 GUI 建模过程借助：GUI: File Menu > List > Log File...，在进行建模的过程中时刻注意对应的命令，随时进行命令简化及其修改，剔除拾取操作中不明确的命令。

2. 求解

求解器用于选择分析类型、设置分析选项，施加载荷，指定载荷步，完成有限元计算。分析中所用到的数据都要指出凝聚法分析中的主自由度，非线性分析中的收敛准则，谐响应分析分析中的频率范围等。载荷和边界条件也可以作为设计变量。

梁的例子中，SOLUTION 部分的输入大致如下：

```
...
/SOLU
ANTYPE, STATIC          !静力分析（默认）
D, 1, UX, 0, , 11, 10, UY !UX=UY=0，梁两端结点固定
```

```

SFBEAM, ALL, 1, PRES, 100      !施加载荷
SOLVE                          !求解
FINISH                          !退出SOLUTION

```

这一步骤将不仅限于一次分析过程，还可以先进行热分析再进行应力分析（热—应力耦合分析）。

3. 参数化提取分析结果

求解完毕，下面提取结果并赋值给相应的参数。这些参数一般为状态变量和目标函数。提取数据的操作用*GET 命令（GUI: Utility Menu > Parameters > Get Scalar Data）实现。通常参数化提取结果借助 POST1 完成，特别是涉及到数据的存储，加减或其他操作。

梁的重量优化问题中总重量是目标函数。因为重量与体积成比例（假定密度是均匀的），那么减小总体积就相当于减小总重量，因此可以选择总体积为目标函数。状态变量选择最大应力和位移。这些参数可以用如下命令流定义：

```

...
/POST1
SET, ...
NSORT, U, Y                      !以UY为基准对结点排序
*GET, DMAX, SORT, , MAX          !参数DMAX=最大位移
!线单元的推导数值由ETABLE得出
ETABLE, VOLU, VOLU              !VOLU=每个单元的体积
ETABLE, SMAX_I, NMISC, 1         !SMAX_I=每个单元I结点处应力的最大值
ETABLE, SMAX_J, NMISC, 3         !SMAX_J=每个单元J结点处应力的最大值
SSUM                            !将单元表中每列的数据相加（计算总体积）
*GET, VOLUME, SSUM, , ITEM, VOLU !参数VOLUME=总体积
ESORT, ETAB, SMAX_I, , 1         !按照单元SMAX_I的绝对值大小排序
*GET, SMAXI, SORT, , MAX         !参数SMAXI=SMAX_I的最大值
ESORT, ETAB, SMAX_J, , 1         !按照单元SMAX_J的绝对值大小排序
*GET, SMAXJ, SORT, , MAX         !参数SMAXJ=SMAX_J的最大值
SMAX=SMAXI > SMAXJ              !参数SMAX=最大应力值
FINISH
...

```

4. 准备分析文件

到此为止，已经对分析文件的基本要求做了较为完整的说明。如果是用系统编辑器来编辑的命令流文件，只需简单存盘进入第二步即可。如果是用 GUI 方式建模，用户必须在交互环境下生成分析文件。生产分析文件可以通过两种方式完，即数据库命令流文件或命令流文件。

数据库文件——可以通过 LGWRITE 命令（GUI: Utility Menu > File > Write DB Log File）生成命令流文件。LGWRITE 将数据库内部的命令流写到文件 Jobname.LGW 中。内部命令流包含了生成当前模型所用的所有命令。

命令流文件——Jobname.LOG 包含了 GUI 方式下用户输入的所有命令。如果用

Jobname.LOG 作为分析文件,用户必须用系统编辑器删除文件中所有不必要的命令!由于 GUI 方式下所有的操作都记录在 LOG 文件中,编辑工作会比较烦琐。而且,如果分析是在几个过程中完成的,就必须将几个 LOG 文合在一起编辑生成一个完整的分析文件。

2. 设定参数变量

分析文件生成后,可以开始执行优化分析。如果采用 GUI 方式进行优化,最好在分析文件中建立参数并写入 ANSYS 数据库中来(命令流方式除外)。初始参数值可作为一阶法的起点,而且,对于各种优化过程来说,参数在数据库中可以在 GUI 下进行操作,便于定义优化变量。下面介绍建立数据库参数的过程:

首先读入与分析文件相联的数据库文件(Jobname.DB),然后在 ANSYS 中建立整个模型的数据。设定参数变量的详细操作步骤如下所示:

1. 读入数据库文件

命令: RESUME

GUI: Utility Menu > File > Resume Jobname.db

Utility Menu > File > Resume from

将分析文件直接读入 ANSYS 进行分析。这需要重新建立整个数据库,对于大模型来说要耗费大量的时间。

2. 读入分析文件

命令: /INPUT

GUI: Utility Menu > File > Read Input from

仅从存储的参数文件中读参数到 ANSYS 中,参数文件是用 PARSAV 命令或由 Utility Menu > Parameters > Save Parameters 存储的。

3. 读入优化参数

命令: PARRES

GUI: Utility Menu > Parameters > Restore Parameters

重新定义分析文件中已存在的参数。不过,这样做需要知道分析文件中定义了那些参数:

命令: *SET or “=” command

GUI: Utility Menu > Parameters > Scalar Parameters

可以选择使用以上任意一种方式,然后用 OPVAR 命令(GUI: Main Menu > Design Opt > Design Variables)来指定优化变量。

注意:

在优化过程中,ANSYS 数据库不一定要与分析文件一致。模型的输入是在优化循环过程中由分析文件中自动读入的。

3. 进入 OPT, 指定分析文件

以下的步骤由 OPT 处理器来完成的。首次进入优化处理器时,ANSYS 数据库中的所有参数自动作为设计序列 1(假定初始参数值是一个设计序列)。下面介绍指定分析文件的详细操作过程:

1. 进入优化处理器

命令: /OPT

GUI: Main Menu > Design Opt

在 GUI 方式下, 用户必须指定分析文件名 (分析文件名无默认值)。这个文件用于生成优化循环文件 Jobname.LOOP。

2. 指定分析文件名

命令: OPANL

GUI: Main Menu > Design Opt > Assign

在命令流方式下, 分析文件通常是命令流的第一部分, 从文件的第一行到命令/OPT 第一次出现。在命令流方式中, 默认的分析文件名是 Jobname.BAT (它是一个临时性的文件, 是命令流输入文件的一个拷贝)。因此, 在命令流方式下通常不用指定分析文件名。但是, 如果出于某种考虑将批文件分成两个部分 (一个用于分析, 另一个用于整个优化分析), 那么就必须在进入优化处理器后指定分析文件 (OPANL)。

注意:

在分析文件中, /PREP7 和/OPT 命令必须出现在行的第一个非零字符处 (即, 不允许有诸如\$等符号出现在有这些命令的行中)。这一点在生成优化循环文件时很关键。

4. 声明优化变量

声明优化变量就是指定哪些参数是设计变量, 哪些参数是状态变量, 哪个参数是目标函数。虽然 ANSYS 优化设计允许有不超过 60 个设计变量和不超过 100 个状态变量, 但是只能有一个目标函数。

声明优化变量:

命令: OPVAR

GUI: Main Menu > Design Opt > Design Variables

Main Menu > Design Opt > State Variables

Main Menu > Design Opt > Objective

对于设计变量和状态变量可以定义最大和最小值。目标函数不需要给定范围。每一个变量都有一个允许误差值, 这个允许误差值可以由用户输入, 也可以选择由程序计算得出。

如果用 OPVAR 命令定义的参数名不存在, ANSYS 数据库中将自动定义这个参数, 并将初始值设为零。

用户可以在任意时间简单地通过重新定义参数的方法来改变已经定义过的参数, 也可以删除一个优化变量 (OPVAR, Name, DEL)。这种删除操作并不真正删除这个参数, 而是不将它继续作为优化变量而已。

5. 选择优化工具或优化方法

ANSYS 程序提供了一些优化工具和方法, 默认单次循环优化。下面介绍优化工具与方法的指定及相关知识:

1. 指定后续优化的工具和方法

命令: OPTYPE

GUI: Main Menu > Design Opt > Method/Tool

2. 优化方法简介

优化方法是使单个函数（目标函数）在约束条件下达到最小值的方法。ANSYS 提供了两种方法：零阶法和一阶法。除此之外，用户可以使用自己的优化算法替代 ANSYS 本身的优化方法进行优化分析。使用其中任何一种方法进行优化之前，必须先定义目标函数。下面介绍两种优化方法：

Ø 零阶法（直接法）

零阶法（直接法）是一个完善的零阶法，使用所有因变量（状态变量和目标函数）的进行逼近。该方法是通用的优化方法，可以有效的处理绝大多数的工程优化问题。

Ø 一阶法（间接法）

一阶法（间接法）使用偏导数，即使用因变量的一阶偏导数进行优化逼近。此方法精度很高，尤其是在因变量变化很大且设计空间也相对较大时效果更好。但是，使用一阶法优化消耗的时间较多。

Ø 用户提供的优化方法

如果用户在特定方法有非常成熟的优化方法，则可以通过外部的优化程序（USEROP）代替 ANSYS 默认的优化方法。

3. 优化工具简介

优化工具是搜索和处理设计空间的技术。因为求得的最小值不一定是优化的最终目标，所以目标函数在使用这些优化工具时可以不指出优化工具，但是必须要指定设计变量。下面介绍可用的优化工具：

Ø 单步运行法

单步运行法每实现一次循环求出一个 FEA 解。用户可以通过一系列的单次循环研究设计变量和目标函数的关系，即每次求解前设定不同的设计变量来研究目标函数与设计变量的变化关系。

Ø 随机搜索法

随机搜索法通过执行多次循环进行优化，每次循环设计变量随机变化。用户可以指定最大循环次数和期望合理化的数目。随机搜索法主要用来研究整个设计空间，并为以后的优化分析提供合理解。

Ø 等步长搜索法

等步长搜索法以一个参考设计序列为起点，生成几个设计序列，然后按照单一步长在每次计算后将设计变量在变化范围内加以改变，评估目标函数和状态变量的整体变化。

Ø 乘子算法

乘子算法是一个统计工具，用来生成由各种设计变量极限值组合的设计序列，主要目标是计算目标函数和状态变量的关系和相互影响。

Ø 最优梯度法

最优梯度法对用户指定的参考设计序列，通过计算目标函数和状态变量对设计变量的梯度寻找最优解。此工具可以确定局部的设计敏感性。

Ø 用户提供的优化工具

用户提供的优化工具允许用户采用外部过程（USEROP）替代 ANSYS 优化工具。只有在专门的优化研究领域的用户才经常使用此功能。用户可以通过 USEROP 过程将自己的方法和

工具补充进去。

6. 指定优化循环控制方式

每种优化方法和工具都有相应的循环控制参数，如最大迭代次数等。为了在计算时间与精度间达到和谐，需要指定合理的优化循环控制方式。下面介绍这些循环控制参数的设定：

1. 指定优化循环控制方式

GUI: Main Menu > Design Opt > Method/Tool

以下是设定控制参数的命令：

命令: OPSUBP (指定迭代次数)

OPEQN (设定零阶法的控制参数)

OPFRST (设定一阶法的控制参数)

OPRAND (设定随机搜索法的控制参数)

OPSWEEP (设定等步长搜索法的控制参数)

OPFACT (设定乘子算法的控制参数)

OPGRAD (设定最优梯度法的控制参数)

OPUSER (设定用户优化工具的控制参数)

2. 设置优化数据存储方法

ANSYS 优化设计程序提供了几种设定优化过程中数据的存储方法：

Ø 指定优化数据的存储文件名（默认为 Jobname.OPT）

命令: OPDATA

GUI: Main Menu > Design Opt > Controls

Ø 定义结果输出选项

用下列方法激活详细的分析结果输出：

命令: OPPRNT

GUI: Main Menu > Design Opt > Controls

Ø 控制优化序列的存储方式

通过下面方法确定最佳设计系列的数据是否存储，（默认是数据库和结果文件存储最后一个设计系列）：

命令: OPKEEP

GUI: Main Menu > Design Opt > Controls

用户还可以控制几个循环特性，设置分析文件在循环中的读取方式：可以从第一行读取（默认），也可以从第一个/PREP7 出现的位置开始读取；设定为优化变量的参数可以忽略（默认），也可以在循环中处理。而且，用户可以指定循环中存储哪种变量：只存储数值变量还是存储数值变量和数组变量。这个功能可以在循环中控制参数的数值（包括设计变量和非设计变量）。

Ø 设置循环控制方式

通过下面方法设定循环控制特性：

命令: OPLOOP

GUI: Main Menu > Design Opt > Controls

注意:

OPLOOP 命令中的 Parms 变量控制在循环中存储哪个参数。在循环中存储数值变量和数组变量的选项在一般情况下不设置, 除非是数组变量在分析文件外定义, 而在循环中需要保存的情况。

7. 进行优化分析

所有的控制选项设定好以后, 进行优化分析:

命令: OPEXE

GUI: Main Menu > Design Opt > Run

在 OPEXE 执行时, 优化循环文件 (Jobname.LOOP) 会根据分析文件生成。这个循环文件对用户是透明的, 并在分析循环中使用。循环在满足下列情况时终止: 收敛, 中断 (不收敛, 但达到了最大循环次数或是最大不合理的数目), 分析完成。

如果循环是由于模型的问题 (如网格划分有问题, 非线性求解不收敛, 与设计变量数值冲突等) 中断时, 优化处理器将进行下一次循环。如果是在交互方式下, 程序将显示一个警告信息并询问是继续执行还是结束循环。如果是在命令流方式下, 循环将自动继续。NCNV 命令 (GUI: Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol'n Controls > advanced nl) 是控制非线性分析的, 在优化循环中将被忽略。中断循环的设计序列将保存起来, 但参数的分析结果可能非常大, 不符合实际情况。

所有优化变量和其他参数在每次迭代后将存储在优化数据文件 (Jobname.OPT) 中, 优化数据文件最多可以存储 130 组这样的序列。如果序列超过 130 个序列, 则数据最 “不好” 的序列将被删除。

对于上述梁的例子, 优化部分的输入大致如下:

```
/OPT                                !进入优化处理器
OPANL, ...                          !分析文件名
!声明优化变量
OPVAR, B, DV, , 5, 16.5             !B和H为设计变量
OPVAR, H, DV, , 5, 8
OPVAR, DMAX, SV, -0.1, 0            !DMAX和SMAX为状态变量
OPVAR, SMAX, SV, 0, 20000
OPVAR, VOLUME, OBJ                  !VOLUME为目标函数
!指定优化类型和控制
OPTYPE, SUBP                        !零阶法
OPSUBP, 30                          !最大迭代次数
OPEXE                               !开始优化循环
```

不同的优化过程可以系列地完成。比如, 可以在零阶法的分析结束后再做等步长搜索。

下面的命令对最佳设计序列做等步长搜索:

```
OPTYPE, SWEEP                       !扫描评估工具
OPSWEEP, BEST, 5                    !最佳设计序列每个设计变量5次评估
OPEXE                               !开始优化循环
```

请查阅/OPT, OPANL, OPTYPE, OPSUBP, OPSWEEP 和 OPEXE 命令以得到更详细的说明。

8. 查看设计序列结果

优化循环结束以后, 可以用命令或相应的 GUI 路径来查看设计序列。这些命令适用于任意优化方法和工具生成的结果。下面介绍查看设计序列结果的操作:

1. 查看设计序列

分析结束需要查看设计序列, 通常需要查看的主要内容如下:

- Ø 列出指定序列号的参数值

命令: OPLIST

GUI: Main Menu > Design Opt > List

可以选择列出所有参数的数值, 也可以只列出优化变量。

- Ø 显示各个参数随迭代变化曲线

命令: PLVAROPT

GUI: Main Menu > Design Opt > Graphs/Tables

用图显示指定参数使其随序列号的变化。

- Ø 改变 X 轴参数, 查看其他参数变化曲线

命令: XVAROPT

GUI: Main Menu > Design Opt > Graphs/Tables

将图形显示窗口的 X 轴由序列号换成别的参数。

对于 PLVAROPT 和 PRVAROPT 操作, 设计序列将自动按照 XVAROPT 中参数以升序排列。

对于等步长, 乘子和梯度工具有一些特别的查看结果的方法: 对于等步长搜索, 用 OPRSW 命令列出结果, 用 OPLSW 命令图示结果; 对于乘子工具, 用 OPRFA 命令列出结果, 用 OPLFA 命令图示结果; 对于梯度工具, 用 OPRGR 命令列出结果, 用 OPLGR 命令图示结果。

另一个得到优化数据的方法是用 STATUS 命令 (GUI: Main Menu > Design Opt > Status)。在优化处理器中使用本命令, 将得到另外一些关于当前优化任务的信息, 如分析文件名、优化技术、设计序列数、优化变量等。用 STATUS 命令可以方便的查看优化环境, 验证需要的设定是否全部输入优化处理器。

除了查看优化数据, 用户可能希望用 POST1 或 POST26 对分析结果进行后处理。默认情况下, 最后一个设计序列的结果存储在文件 Jobname.RST (或.RTH 等, 视分析类型而定)中。如果在循环运行前将 OPKEEP 设为 ON, 最佳设计序列的数据也将存储在数据库和结果文件中。“最佳结果”在文件 Jobname.BRST (.BRTH 等)中, “最佳数据库”在文件 Jobname.BDB 中。

2. 删除不需要的序列

查看数据以后, 可能需要对其做一些操作。比如说, 在随机搜索后, 用户可能希望将所有的不合理设计序列删除, 以合理的设计序列为数据点来进行后面的优化。这里提供了几种改变设计序列的方法:

- Ø 选择最佳设计序列或所有合理的序列

命令: OPSEL

GUI: Main Menu > Design Opt > Select/Delete

注意:

所有没有用 OPSEL 命令选择的设计序列将永久地从优化数据库中删除!

Ø 删除指定范围内的设计序列

命令: OPDEL

GUI: Main Menu > Design Opt > Select/Delete

采用上面两个命令进行删除操作, 剩余设计序列的原始序列号将不变。(优化数据库可以存储 130 个设计序列。)

3. 对设计序列进行排序

删除不合理的设计序列后, 通常需要对设计序列进行排序, 为后面的优化提供较好的初始序列, 加快优化过程。下面介绍常用的设计序列排序方法:

Ø 将两个序列相加

命令: OPADD

GUI: Main Menu > Design Opt > Combine

将两个现存的序列相加形成一个新的设计序列, 在相加操作中还可以使用比例系数。

Ø 由当前参数生成新的设计序列

命令: OPMAKE

GUI: Main Menu > Design Opt > Create

用当前的数值参数值(没有在分析循环中运行)生成一个新的

4. 执行多层优化计算

很多情况下要做优化计算不止一次, 比如在一次优化后没有找到需要的优化结果, 或是用一种优化工具开始计算然后做随后的优化分析(例如, 先进行随机搜索, 然后用零阶法)。第一次较少次数的循环中得到的结果可以作为修改设计空间并进行以后优化分析的依据。

如果用户在同一次 ANSYS 运行中执行所有的优化时过程很顺利, 在执行一次优化后以后, 只需简单的重新定义所有的优化输入, 即可开始下一步分析。下面介绍进行多层优化的步骤:

(1) 开始下一步分析

命令: OPEXE

GUI: Main Menu > Design Opt > Run

如果在执行完一次优化以后退出了 ANSYS, 可以重新选择优化方法执行后续的分析。

(2) 读入优化数据库文件

要重新开始优化分析, 通过如下命令读入优化数据库文件(Jobname.OPT):

命令: OPRESU

GUI: Main Menu > Design Opt > Resume

数据读入后, 指定优化类型, 控制等, 然后开始循环(对应于数据库的分析文件必须可用以完成优化)。

(3) 执行循环迭代

命令: OPEXE

GUI: Main Menu > Design Opt > Run

标准的重启动大致如下:

```
...
...
/OPT
OPRESU, .....      !读入文件 (默认为Jobname.OPT)
OPSEL, 10            选择10个最佳设计
OPTYPE, ....         !指定优化工具或方法
....                !指定其他优化输入
OPEXE                !开始优化循环
```

请查阅/OPT, OPRESU, OPSEL, OPTYPE 和 OPEXE 命令以得到更详细的说明。

注意:

除了优化数据, ANSYS 工作文件名将存储在优化数据库文件中 (Jobname.OPT), 因此, 如果优化数据文件被读入, 该文件名将覆盖当前的文件名 (/FILENAME)。

在交互方式下可以用 OPRESU 命令 (GUI: Main Menu > Design Opt > Resume) 读入命令流方式下生成的优化数据, 这样便于交互的查看命令流优化的数据。

如果在读入数据前优化数据库中有数据的话, 应当首先清除优化数据库。在这个过程中, 所有的设置将恢复其默认值, 所有的设计序列将被删除。首先需要清除当前数据库中的数据:

命令: OPCLR

GUI: Main Menu > Design Opt > Clear&Reset

因为 ANSYS 数据库不受 OPCLR 命令影响, 所以在读入一个新的优化数据库前应该清除 ANSYS 数据库:

命令: /CLEAR

GUI: Utility Menu > File > Clear&Start New

与 OPRESU 命令相对应的是 OPSAVE 命令 (GUI: Main Menu > Design Opt > Save), 其功能是将优化数据写入指定的文件中 (默认为 Jobname.OPT)。优化数据在每次优化循环结束的时候自动存储 (见 OPDATA 命令), 但用户也可以随时用 OPSAVE 命令存储优化数据。

7.1.3 优化方法介绍

理解计算机程序的算法总是很有用的, 尤其是在优化设计中。在这一部分中, 将对下列方法进行简单的说明: 零阶法, 一阶法, 随机搜索法, 等步长搜索法, 乘子算法和最优梯度法。

1. 零阶法

零阶法之所以称为零阶法是由于它只用到因变量而不用到它的偏导数。在零阶法中有两个重要的概念: 目标函数和状态变量的逼近方法和约束的优化问题转换为非约束的优化问题。首先介绍逼近方法:

1. 逼近方法

采用逼近方法时, 程序用曲线拟合来建立目标函数和设计变量之间的关系, 即用几个设

计变量序列计算目标函数，然后求得各数据点间最小平方实现的。该结果曲线（或平面）叫做逼近。每次优化循环生成一个新的数据点，目标函数完成一次更新。实际上，这种方法逼近的是被求解最小值而非目标函数。状态变量处理方式与目标函数相同，每个状态变量都生成一个逼近并在每次循环后更新。

用户可以对优化逼近曲线进行控制，即可以指定线性拟合、平方拟合或平方差拟合。默认情况下，用平方差拟合目标函数，用平方拟合状态变量。用下列方法实现拟合参数控制：

命令：OPEQN

GUI: Main Menu > Design Opt > Method/Tool

OPEQN 同样可以控制设计数据点在形成逼近时如何加权。

2. 优化问题类型的转换

如果状态变量和设计变量的数值范围约束了设计，优化问题就成为约束的优化问题。因为后者的最小化方法比前者更有效率，通常 ANSYS 优化程序将约束的优化问题转化为非约束问题，问题类型的转换是通过将约束以罚函数的形式计入约束的目标函数实现的。

搜索非约束目标函数的逼近是在每次迭代中用 Sequential Unconstrained Minimization Technique (SUMT) 实现的。

3. 收敛检查

在每次循环结束时都要进行收敛检查。如果，最佳设计是合理的而且满足收敛条件问题，则问题收敛。下面介绍收敛与不收敛的判别依据：

(1) 收敛的条件

- Ø 目标函数值由最佳合理设计到当前设计的变化应小于目标函数允许误差
- Ø 最后两个设计之间的差值应小于目标函数允许误差
- Ø 从当前设计到最佳合理设计所有设计变量的变化值应小于各自的允许误差
- Ø 最后两个设计所有设计变量的变化值应小于各自的允许误差

用下列方法指定目标函数和设计变量允差：

命令：OPVAR

GUI: Main Menu > Design Opt > Design Variables

Main Menu > Design Opt > Objective

收敛并不代表实际的最小值已经得到了，只说明至少满足了上述四个准则的一条或者多条。因此，用户必须确定当前设计优化的结果是否满足实际要求。如果不足的话，就要另外做附加的优化分析。

(2) 不收敛的条件

有时候求解过程会在收敛前终止，这是因为发生下列情况之一：

- Ø 迭代达到了指定的循环次数
- Ø 连续的不合理设计达到了指定的值（OPSUBP 命令的 NINFS 域）（默认值为 7）

4. 零阶法的特殊问题

由于目标函数和状态变量都是使用逼近的，因此优化设计和逼近数值具有同样的精确度。为了得到较好的逼近，这里有一些经验：

(1) 设置合理的初始设计加速优化进程

对于零阶法，优化处理器开始通过随机搜索建立状态变量和目标函数的逼近。由于是随

机搜索，收敛的速度可能很慢。用户可以通过给出多个较为合理的起始设计来加速收敛，可以只简单的运行一系列的随机搜索并删除所有不合理的设计即可显著的提高优化进程。下面介绍设置初始设计加快优化进程的操作：

1) 运行随机搜索

命令：OPTYPE,RAND

GUI: Main Menu > Design Opt > method/Tool

2) 删除所有不合理设计

命令：OPSEL

GUI: Main Menu > Design Opt > Select/Delete

也可以运行多次单独的循环，并在每次运行前指定新的设计变量序列来生成起始设计序列。

3) 设置单独循环

命令：OPTYPE,RUN

GUI: Main Menu > Design Opt > Method/Tool

如果对问题的特性有些认识的话，后一种方法更好些。

注意：

做一些小的设计分析将有利于收敛。但如果设计之间差别不大，也就是说设计数据点“堆积”在一起时，用户就要指定优化处理器沿一个指定的路径分析，以避免丢掉好的设计。

(2) 调试不合理的设计

如果零阶法生成了许多不合理的设计的话，可能说明状态变量的近似不能良好的反映状态变量的实际情况。在这种情况下，可以通过设定合理的参数重新进行优化分析：

1) 进入附加分析

命令：OPSUBP,NINFS

GUI: Main Menu > Design Opt > Method/Tool

如果合理的设计好象要达到了，可以增加连续不合理设计的允许误差值，然后进行附加的零阶法分析。

2) 调整迭代设定提高优化效果

命令：OPSEL

GUI: Main Menu > Design Opt > Select/Delete

在连续的逼近中不断的选择最佳设计，可以得到更好的曲线拟合。

3) 在状态变量逼近时选择交叉项

命令：OPEQN,KFSV

GUI: Main Menu > Design Opt > Method/Tool

2. 一阶法

同零阶法一样，一阶法通过对目标函数添加罚函数将约束问题转换为非约束问题。但是与零阶法不同的是一阶法将真实的有限元结果最小化，而不是对逼近数值进行优化。

一阶法使用因变量对设计变量的偏导数。在每次迭代中，梯度计算（用最大斜度法或共轭方向法）确定搜索方向，并用线搜索法对非约束问题进行优化。因此，每次迭代都有一系

列的子迭代（其中包括搜索方向和梯度计算）组成。这就使得一次优化迭代有多次分析循环。OPFRST 命令（GUI: Main Menu > Design Opt > Method/Tool）有两个输入域可以用来改善一阶法的收敛。用户可以指定计算梯度的设计变量范围变化程度，也可以指定线搜索步长的范围。一般来说，这两个输入值的默认数值就足够了。下面介绍一阶法的收敛条件及其需要注意的事项。首先介绍收敛条件：

1. 收敛检查

一阶法在收敛或中断时结束。在当前的设计序列相对于前面的和最佳序列满足下面任何一种情况时，问题就称为收敛：

- Ø 目标函数值由最佳合理设计到当前设计的变化应小于目标函数允许误差
- Ø 从当前设计到前面设计目标函数的变化值应小于允许误差
- Ø 同时要求最后的迭代使用最大斜度搜索，否则要进行附加的迭代

为了使 ANSYS 便于判断分析是否收敛，需要首先设定允许误差值提供优化的收敛条件。

下面指定目标函数允许误差的操作，如下：

命令：OPVAR

GUI: Main Menu > Design Opt > Objective

用 OPFRST 命令的 NITR 域指定最大迭代次数达到的情况下可能出现问题在收敛之前可能中断。

2. 一阶法的特殊情况

与零阶法相比，一阶法计算量大且结果精确。但是，精确度高并不能保证最佳求解。下面是一些注意事项：

- Ø 一阶法可能收敛于不合理的设计序列

这时得到的结果可能是局部最小值，也可能是不存在合理设计空间。如果出现这种情况，可以使用零阶法重新分析（零阶法可以更好的研究整个设计空间）；也可以先运行随机搜索确定合理设计空间（如果存在的话），然后以合理设计序列为起点重新运行一阶法。

- Ø 一阶法更容易获得局部最小值

这是因为一阶法从设计空间的一个序列开始计算求解，如果起点很接近局部最小值的话，就会选择该最小值而找不到全局最小值。如果怀疑得到的是局部最小值，可以用零阶法或随机搜索验证。

- Ø 目标函数允许误差过小将会引起迭代次数过多

因为一阶法计算实际有限元解（而非逼近），在计算过程中会根据给定的允许误差尽量找到确切的结果。

3. 随机搜索法

对于随机搜索法（OPTYPE, RAND），程序完成指定次数的分析循环，并在每次循环中使用随机搜索变量值。用户可以用 OPRAND 命令（GUI: Main Menu > Design Opt > Method/Tool）指定最大迭代次数和最大合理设计数。如果给出了最大合理设计数，在达到这个数值时循环将终止，而忽略最大迭代次数是否达到。

随机搜索法往往作为零阶法的先期处理，当然它也可以用来完成一些小的设计任务。例如可以做一系列的随机搜索，然后通过查看结果来判断当前设计空间是否合理。

4. 等步长搜索法

等步长搜索法 (OPTYPE, SWEEP) 用于在设计空间内完成扫描分析, 生成 $n \times \text{NSPS}$ 个设计序列 (n 是设计变量的个数, NSPS 是每个扫描中评估点的数目 (由 OPSWEEP 命令指定))。对于每个设计变量, 变量范围将划分为 NSPS-1 个相等的步长, 进行 NSPS 次循环。问题的设计变量在每次循环中按步长递增, 其他的设计变量保持其参考值不变。设计序列中设计变量的参考值用 OPSWEEP 命令的 Dset 指定 (GUI: Main Menu > Design Opt > Method/Tool)。

下面介绍如何采用图形和列表显示等步长搜索结果:

☐ 显示设计变量数和响应变量的数值关系曲线

命令: OPLSW

GUI: Main Menu > Design Opt > Tool Results > Sweeps

曲线的纵坐标表示目标函数或状态变量的实际数值, 横坐标表示正交化 (0 到 1) 的设计变量, 正交范围为设计变量的最大最小值 (OPVAR)。

☐ 列表显示优化结果

命令: OPRSW

GUI: Main Menu > Design Opt > Tool Results > Print

将以列表的方式显示出正交化的响应数据值和正交化的设计变量值 (目标函数和状态变量的结果与参考设计序列数值正交 (OPSWEEP, Dset))。对于设计变量, 0 对应于最小值, 1 对应于最大值。

5. 乘子算法

乘子算法 (OPTYPE, FACT) 主要用二阶技术生成设计空间上极值点上的设计序列数值, 这种二阶技术在每个设计变量的两个极值点上取值。可以用 OPFACT 命令 (GUI: Main Menu > Design Opt > Method/Tool) 指定是完成整体的还是部分的评估。对于整体评估, 程序进行 2^n 次循环, n 是设计变量的个数。1/2 部分的评估进行 $2^{n/2}$ 次循环, 依此类推。下面介绍如何通过图示和列表显示乘子计算结果:

☐ 命令显示棒式图

命令: OPLFA

GUI: Main Menu > Design Opt > Tool Results > Factorial

可以用棒式图和表格显示目标函数或状态变量的某些方面。例如, 可以图示每个设计变量对目标函数的主要作用。用户同样可以查看两个和三个变量之间的互相作用。

☐ 列表显示目标函数或状态变量的作用:

命令: OPRFA

GUI: Main Menu > Design Opt > Tool Results > Print

6. 最优梯度法

最优梯度法 (OPTYPE, GRAD) 计算设计空间中某一点的梯度, 梯度结果用于研究目标函数或状态变量的敏感性。下面介绍如何采用最优梯度法进行优化首先需要指定设计序列:

命令: OPGRAD

GUI: Main Menu > Design Opt > Method/Tool

采用最优梯度法时, 循环次数等于设计变量的数目。

计算完毕后, 通过图示和列表显示最优梯度法的结果。这里只介绍如何通过列表显示分析结果, 操作如下:

命令: OPRGR

GU: Main Menu > Design Opt > Tool Results > Print

用户可以用图形显示设计变量和响应变量的数值, 其纵坐标表示目标函数或状态变量的实际数值, 横坐标表示设计变量一个小的 (1%) 变化值。1% 的变化值是相对于设计变量的变化范围 (由 OPVAR 命令中 MAX-MIN 数值确定), 而不是相对于当前的设计变量数值的。

7.1.4 选择优化变量的说明

下面列出了许多如何定义设计变量, 状态变量和目标函数的建议, 对读者进行优化分析会很有帮助。首先介绍如何选择设计变量:

1. 关于选择设计变量的说明

设计变量往往是长度, 厚度, 直径或模型坐标等几何参数, 其必须是正值。关于设计变量要记住的以下几点:

1. 使用尽量少的设计变量

设计变量数目要少: 推荐不超过 20 个; 最好是小于 10 个。选用太多的设计变量会使得收敛于局部最小值的可能性增加, 在问题是高度非线性时甚至会导致结果不收敛。显而易见, 越多的设计变量需要越多的迭代次数, 从而需要更多的计算时间。一种减少设计变量的做法就是将其其中的一些变量用其他的设计变量表示。这通常叫做设计变量合并。例如, 删除 R3 可以将其表示为 R1 和 T1 的函数。R4 也同样 (如图 7-3 所示)。

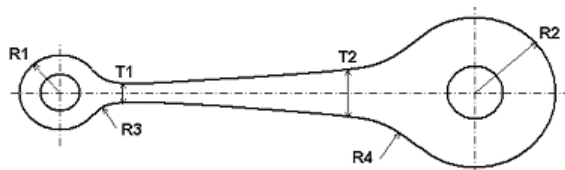


图 7-3 连杆模型

注意:

如果不是分析必须, 要避免指定密度。这将节省计算质量矩阵所需的时间!

设计变量合并不能用于设计变量是真正独立的情况下, 但是可以根据模型的结构判断是否允许某些设计变量之间可以逻辑的合并。例如, 如果优化形式是对称的, 可以用一个设计变量表示对称部分 (如图 7-4 所示), 即无论什么时候, 只要可能, 就应该利用对称性-优化程序执行多次分析, 所以规模越小越好!

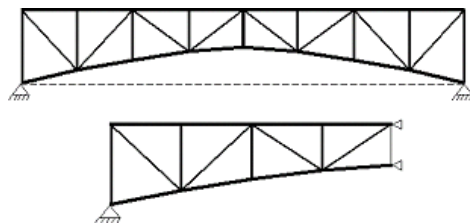


图 7-4 利用结构的对称性减少设计变量

2. 设定合理的取值范围

给设计变量定义一个合理的范围（OPVAR 命令中的 MIN 和 MAX），范围过大可能不能表示好的设计空间，而范围过小可能排除好的设计。

注意：

只有正的数值才是可行的，因此要设定一个下限。

3. 选择合理的设计变量

选择可以提供实际优化设计的设计变量。例如，可以只用一个设计变量 X_1 对图 7-5 (a) 所示悬臂梁进行重量优化。但是，这排除了用曲线或变截面得到更小的重量的可能。为了包括这种设计，需要选择四个设计变量 X_1 到 X_4 （如图 7-5 (c) 所示）。也可以用另外一种设计变量选择方法完成该优化设计，如图 7-5 (d) 所示。同时，要避免选择产生不实际结果或不需要的的设计。另外，如果需要指定离散的设计变量（如肋数或者孔数），建模时用 NINT 函数（最接近的整数）。

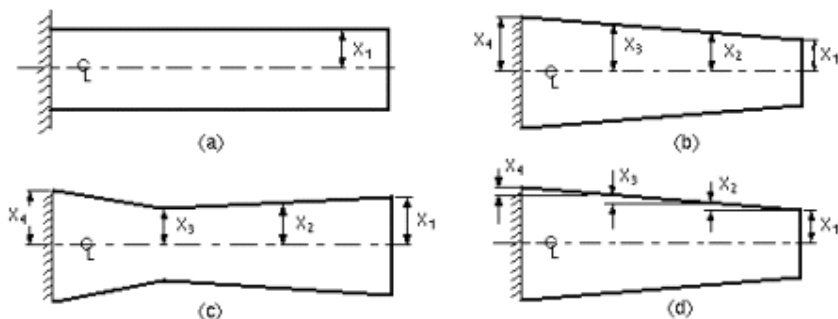


图 7-5 阶梯型悬臂梁的设计变量选择

2. 关于选择状态变量的说明

状态变量通常是控制设计的因变量数值。状态变量可以是应力，温度，热流率，频率，变形，吸收能，消耗时间等参数的一种或者多种。状态变量必须是 ANSYS 可以计算的数值，实际上任何参数都能被定义为状态变量。选择状态变量需要注意以下几点：

1. 设定合理的状态变量取值范围

设定合理的取值范围，避免状态变量两端边界的限制太严格，但需要指定合理的变量范围。如果问题存在奇异，例如一点载荷或者一个凹角（Re-entrant corner），最大应力总是出现

在此位置，可以考虑在得到最大应力之前，不选择（Unselect）此区域。

在定义状态变量（OPVAR 命令）时，在 MIN 域中输入空值表示无下限。同样，在 MAX 域中输入空值表示无上限。在这两个域中输入 0 值表示以 0 为限，如：

```
UPVAR, SIG, SV, , 1000      !SIG小于等于1000
OPVAR, SIG, SV, 0, 1000     !SIG大于等于0且小于等于1000
```

2. 选择足够数量的状态变量，保证约束的可靠性

要保证优化计算收敛，得到的结果可用就必须选择足够数量的状态变量。如在应力分析中，只选择最大应力数值为状态变量就不是很好。因为在不同循环中，最大应力位置是变化的；同样也要避免另一个极端，例如选择每个单元中的应力都为状态变量。比较好的方法是定义几个关键位置的应力为状态变量。

在零阶法中，如果可能的话，选择与设计变量为线性或平方关系的参数为状态变量。例如，状态变量 $G=Z_1/Z_2$ 且 $G<C$ (Z_1 和 Z_2 是设计变量， C 是常数)可能不会得到 G 的较好的逼近，因为 G 与 Z_2 是反比关系。如果将状态变量表示为 $G=Z_1-(C*Z_2)$ 且 $G<0$ ，状态变量逼近就准确了。

如果状态变量有上下限时，应该给定一个合理的限制值（OPVAR 命令的 MIN 和 MAX 域），但是限制值应避免范围过小。例如 500 到 1000psi 的应力范围要比 900 到 1000psi 的范围好。

如果要指定相同的约束数值（如频率为 386.4HZ），定义两个相同数值的状态变量将实际值包含起来，如下面命令所示：

```
...
*GET, FREQ, ACTIVE, , SET, FREQ      !参数FREQ等于计算频率
FREQ1=FREQ
FREQ2=FREQ
...
/OPT
OPVAR, FREQ1, SV, , 387              !上限FREQ1=387
OPVAR, FREQ2, SV, 386              !下限FREQ2=386
...
```

合理区域现为 386 到 387，但每个状态变量有足够宽的范围以加速逼近（见 OPVAR 命令）。在定义参数前使用区域选择功能，避免在奇异点处（如集中载荷）附近选择状态变量。

3. 关于选择目标函数的说明

目标函数是设计要最小化或最大化的数值。选择目标函数要记住以下几点：

1. 选择合理的目标函数

ANSYS 优化程序总是取目标函数的最小化。如果要最大化数值 x ，就将问题转化为求数值 $x_1=C-x$ 或 $x_1=1/x$ 的最小值，其中 C 是远大于 x 的数值。定义 $C-x$ 的方法比用 $1/x$ 的方法要好，因为后者是反比关系，在零阶法中不能得到准确的逼近。

2. 保证目标函数的分析全程为正值

目标函数值在优化过程中应为正值，因为负值将会引起数据问题。为了避免负值出现，

可以将一个足够大的正值加到目标函数上（大于目标函数的最大值）。

4. 关于优化分析的总体建议

本部分说明了在优化设计中要注意的一些关键点。最重要的一点是要记住优化过程是一系列的分析过程，即一系列的前处理-求解-后处理-优化的循环；建议从一个简单的例子开始理解整个优化的过程。一旦理解了这个过程，求解实际问题时就会觉得很方便。下面按照优化的步骤介绍。

1. 生成分析文件

通过交互方式建模后有两种方式生成分析文件：用内部数据库命令流（LGWRITE）（GUI: Utility Menu > File > Write DB Log File），或通过过程命令流文件（Jobname.LOG）。用内部数据库命令流有几个优点：

LGWRITE 命令有一个选项（Kedit 域）删除不重要的命令，或将其作为注释行写到文件中。该选项会自动对命令流文件进行处理，但用户仍应需要查看文件是否适合优化。内部数据库命令流包括整个模型的数据库，因此不需要几个文件拼凑起来。数据库命令流是存储在数据库文件中（Jobname.DB）的，读入的数据库将包含其完整的数据库命令流。

注意：

（1）推荐在 LGWRITE 命令 Kedit 域中使用 Kedit=COMMENT 而不用 Kedit=REMOVE。有些被 Kedit 过滤的命令有可能在后面*GET 操作中用到（如 EXREM 和 PLNSOL）。这些命令在 Jobname.LGW 的最后编辑中不能作为备注行。

（2）/CLEAR 命令将数据库从内存中清除，同时也清除了数据库命令流。在每次优化循环的开始将运行一个/CLEAR 命令。如果/LGWRITE 命令是在优化循环以后输入的，那么结果文件将是不完整的命令流。一般，数据库命令流文件是在优化循环开始前写的。

在定义优化变量时不能用鼠标拾取的操作。如果因为拾取较方便而使用了这种操作，那么特殊的 GUI 生成命令（如 FLST 和 FITEM）将写入命令流中，在最后处理命令流文件时将些命令转化为参数形式将非常烦琐。

2. 修改设计变量序列

在执行了一次或多次优化分析后（OPEXE），用户可能要删除一些设计变量（OPVAR,Name,DEL）然后进行随后的分析。通常，用户需要这些参数的数值保持不变（在最后优化过程的数值或用户指定的数值），不想恢复分析文件中的数值。假定在循环文件中没有重定义设计变量值，可以用下列方法修正“删除”了的设计变量数值：

Ø 在分析文件中，在/PREP7 命令前初始化设计变量数值。只有后来要修改的参数才出现在/PREP7 命令后。

Ø 在下次优化前，使用 OPLOOP, PREP 命令（GUI: Main Menu > Design Opt > Controls）从第一个/PREP7 处读入分析文件。

如果不做上面两步操作，在以后的优化分析中设计变量将设为其初始值。在下面的例子中，从两个设计变量 AREA1 和 AREA2 开始进行优化。然后 AREA2 被“删除”（不再是设计变量），保持其当前值：

```
AREA1=5.00          !AREA1是第一个面积
AREA2=5.00          !AREA2是第二个面积
```

```

/REP7                                !进入REP7前处理器
!用AREA1和AREA2建立参数化模型...

...
FINISH
/SOLVE
!施加载荷等并求解

...
FINISH
/POST1
SET,...

...
*GET, SIG1,...                       !定义用做状态变量和目标函数的参数
*GET, SIG2,...
*GET, SIG3,...

...
FINISH
/OPT                                !进入优化分析模块
OPVAR, AREA1, DV,...                 !定义参数AREA1和AREA2为设计变量
OPVAR, AREA2, DV,...
OPVAR, SIG1, SV,...                  !指定状态变量
OPVAR, SIG2, SV,...
OPVAR, TVOL, OBJ                     !指定目标函数
OPTYPE, SUBP                         !零阶法
OPEXE                                !执行优化
OPVAR, AREA2, DEL                    !删除设计变量AREA2
STATUS                               !验证当前优化变量
OPLoop, PREP                         !从第一个/REP7位置读入分析文件
OPTYPE,...                           !指定优化类型
...                                  !指定其他优化控制
OPEXE                                !执行优化
FINISH

```

3. 修正优化变量

使用 OPVAR 命令 (GUI: Main Menu > Design Opt > Design Variables) 可以在优化执行之间修改优化变量。例如, 用户如果想修改目标函数的允许误差、状态变量的上下限、删除一个设计变量或者定义一个新的设计变量, 不论是哪种情况, 只要优化变量在一次优化分析后修改了, 程序将自动对优化数据库进行相应的修改。这不影响现存的设计序列和优化设定选项。为了保证优化结果的可靠性, 需要注意以下事项:

Ø 保证优化结果为全局最小值

有些情况下, 求解过程将终止于得到一个局部最小值而非全局最小值。要验证这种情况

是否存在，可以用一个不同的初始设计序列（即不同的初始设计变量值）重新进行分析。

Ø 选择合理的优化变量

如果对于当前分析材料密度不是必须的，应避免指定材料密度，以加快质量矩阵的计算速度。因为重量=密度*体积，所以可以通过这种方式参数化地计算重量，而把体积作为最小化的目标（假定模型密度是均匀的）。

Ø 保证优化过程有合理的网格密度

在形状优化问题中，循环之间有限元网格是变化的，因此验证网格精度是否足够非常重要。通过用参数方式指定网格划分数或网格大小，可以在每次循环中正确的改变值。在线性应力或热分析中，可以用能量法则列出每次循环的误差。一个更加有趣的扩展方式是在设计优化循环中进行一次自适应网格循环来保证网格划分误差不超过一个定值。下面介绍列出误差的操作：

命令：PRERR

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

Utility Menu > List > Results > Percent Error

Ø 尽量使用子结构简化模型

如果模型只有一部分在优化设计中改变的话，可以考虑把不变的部分作成子结构。优化运行将只在使用部分（和扩展部分，如果必须的话）进行循环，从而大大节省计算时间。

7.1.5 优化分析实例

1. 教学目的

这里通过一个简单的简支梁优化分析，让读者掌握如何利用 ANSYS 优化模块分析未知参数获得最优解。本例分析采用的 GUI 方式，对于初次接触 ANSYS 优化分析的读者很有帮助，建议读者在学习完本例之后多练习。

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 优化分析。

分析类型：优化分析。

单元类型：BEAM3

ANSYS 功能示例：实体建模包括基本的建模操作，定义刚性点；施加集中载荷；参数的定义及分析结果的参数化提取；数据排序；声明优化变量。

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

这是一个简单的矩形梁参数优化分析，通过分析了解借助 ANSYS 实现结构优化设计的大致过程。过程包括全部通过参数定义结构，选取那些参数可以用来设计构思，选择和定义目标参数，设定分析误差来确保问题在最短时间内收敛到最优值。同时，本例中将介绍通过在线中间的 Hardpoint 定义载荷及约束。

矩形梁模型如图 7-6 所示，材料为钢材，弹性模量为 200Gpa。距梁左端点 750mm 处受 1000N 集中外力载荷。优化目标是在保证结构安全的情况下使梁所用材料最省，即梁的体积最小。由于长度值已定，则优化目标转为使梁的横截面面积最小。约束条件：梁横截面的高和宽都不能小于 10mm，梁所能承受的最大应力为 200MPa。。

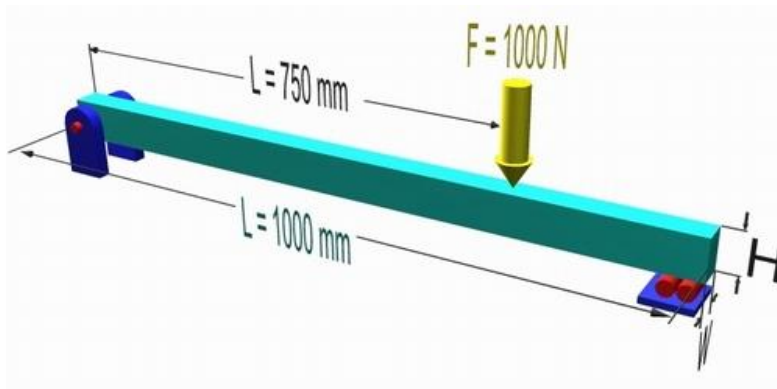


图 7-6 简支梁模型

3. 生成分析文件

生成简支梁的分析文件操作如下所示：

1. 添加标题

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

标题为: Design Optimization

命令: /title, Design Optimization

2. 定义参数变量初始值（初始设计变量）

在 ANSYS 系统中，为解决优化问题，需要将所有结构变量定义为变量。

定义初始参数，操作如下：

GUI: Utility Menu > Parameters > Scalar Parameters...

在 Scalar Parameters 对话框中（如图 7-7 所示）的 Selection 栏键入 “w=20”，单击 Accept，在 Selection 栏再键入 “H=20”，单击 Accept 按钮。单击 Close 按钮。



图 7-7 定义几何参数

注意:

在 ANSYS 系统中，当参数值为负时系统不予接受。

3. 定义关键点（简支梁的端点）

其操作如下：

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

根据提示键入关键点坐标。

命令: K, 1, 0, 0

K, 2, 1000, 0

4. 定义直线（简支梁实体模型）

通过已定义的关键点，操作如下：

GUI: Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Lines > In Active Coord

命令: L, 1, 2

5. 定义刚性点（施加载荷的假象点）

通常，在一个并不存在的点上定义约束或者载荷时，常要用到刚性点。此问题中需要在距支点为梁 3/4 长度位置施加一个载荷。因为，距支点 3/4 位置处根本没有关键点，而且断定需要定义一个刚性点来定义载荷。

通过比例定义刚性点，操作如下：

GUI: Preprocessor > Modeling > Create > Keypoints > Hard PT on line > Hard PT by ratio

根据提示定一个刚性点，根据提示点选线段，在弹出的根据比例生成关键点（Create HardPT by Ratio）对话框键入“0.75”（如图 7-8 所示）。通过上面操作在距支点为梁全长 3/4 处定义了 3# 关键点。

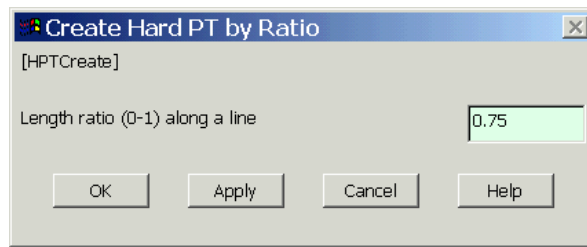


图 7-8 定义刚性点

6. 选择单元

其操作如下：

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

选取 BEAM3 单元。

7. 定义实常数

定义单元的几何参数，操作如下：

GUI: Preprocessor > Real Constants... > Add...

在定义 BEAM3 单元实常数 (Real Constants for BEAM3) 对话框中，键入下面参数：

横截面积 (Cross-sectional area AREA): $W \cdot H$

面积转动惯量 (Area moment of inertia IZZ): $(W \cdot H^3) / 12$

沿 Y 轴方向厚度 (Thickness along Y axis): H

注意：

在优化问题中，通过独立变量定义其他变量非常重要。本例中，梁的宽度和高度随着迭代的进行不断变化，与之相关联的其他变量必须用宽度和高度为参数定义。

8. 定义材料属性

定义弹性模型和泊松比的操作如下：

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

在弹出的对话框中，键入下面参数：

杨氏模量 (即弹性模量, Youngs modulus EX): 200000

泊松比 (Poissons Ratio PRXY): 0.3

命令: MP, EX, 1, 200000

MP, PRXY, 1, 0.3

9. 设定网格尺寸

定义线性单元尺寸，操作如下：

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

取网格边长为 100mm (即沿线长度方向分为 10 份)。

10. 划分网格

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

命令: LMESH, ALL

11. 选择分析类型

静力学分析，选择 Static 类型，操作如下：

GUI: Solution > Analysis Type > New Analysis > Static

命令: ANTYPE, 0

12. 定义梁的端点约束

通过关键点位移定义约束，操作如下：

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

根据提示，选择 1# 关键点，在 Apply U, ROT on KPs 对话框的 DOFs to be constrained 栏选择 UY、UX。单击 OK 按钮。通过相同的操作约束 2# 关键点 UY 方向位移。

13. 在刚性点上施加载荷

在 3# 关键点（刚性点）施加载荷，操作如下：

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

选择 3# 关键点，单击 OK 按钮。在 Apply F/M on KPs 对话框中，载荷沿 FY 方向，大小为 -2000N。

图 7-9 所示为施加约束及载荷后模型图。

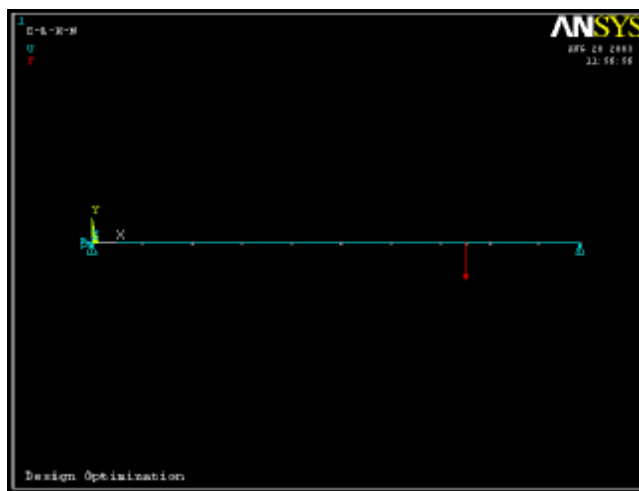


图 7-9 模型约束及载荷

14. 求解，生成分析文件

其操作如下：

GUI: Solution > Solve > Current LS

命令: SOLVE

4. 设定参数变量

要实现结构设计优化，必须得到相关信息，这里应该了解梁的最大应力位置、梁的体积，这些都要用宽度和高度为基本参数表示。下面介绍设置这些变量的定义过程。首先是优化变量（梁的体积），然后是梁的最大应力，具体定义过程如下所示：

1. 定义优化变量

优化变量为梁的总体积，下面介绍如何通过单元列表定义优化变量：首先提取单元体积

变量，然后求单元的总体的积，将单元的总体的积定义为优化变化。具体操作过程如下所示：

(1) 提取单元体积变量

通过单元列表定义新变量，操作如下：

GUI: General Postproc > Element Table > Define Table

在弹出的 Define Additional Element Table Items 对话框中，按照图 7-10 定义梁的体积。

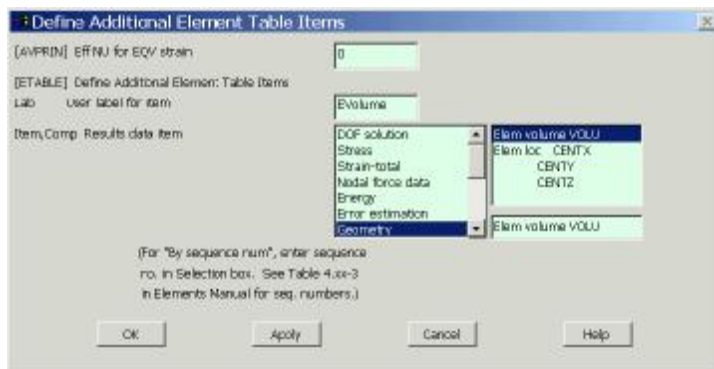


图 7-10 定义新增变量

应该注意到，这里定义的是每个单元的体积。如果，列出单元列表，那么得到的将是每个单元的体积，所以，还需要将单个单元的体积相加才能得到梁的总体积。下面将详细讲述如何得到梁的总体积。

(2) 求单元的总体的积（梁的体积）

通过 Sum 命令求的单元体积之和，操作如下：

GUI: General Postproc > Element Table > Sum of Each Item...

随后弹出一个提示对话框，告知准备计算。单击 OK 按钮。计算完成后有对话框提示单元总体的积为 400000。

(3) 将单元总体的积定义为优化变量

首先提取数据，操作如下：

GUI: Utility Menu > Parameters > Get Scalar Data...

在弹出的 Get Element Table Sum Results 对话框中，选择 Results Data 和 Elem table sums，在下面对话框中，将数据保存为体积（Volume）参数（如图 7-11 所示）。



图 7-11 将体积数据保存为参数

现在，察看是否成功将 Volume 定义为参数，操作如下：

GUI: Utility Menu > Parameters > Scalar Parameters...

对话框显示，Volume 已经被接受。

2. 将单元的最大应力定义为状态变量

对于 BEAM3 单元，需要定义分别定义单元的 I、J 节点的最大应力，然后取两个节点的较大应力为状态变量。首先介绍定义 I 节点最大应力的操作过程：

(1) 提取单元 I 节点最大应力

首先添加变量表示 I 节点最大应力，操作如下：

GUI: General Postproc > Element Table > Define Table > Add...

弹出 Define Additional Element Table Items 对话框。依图 7-12，将单元 I 节点的最大应力并保存为 SMAX_I。

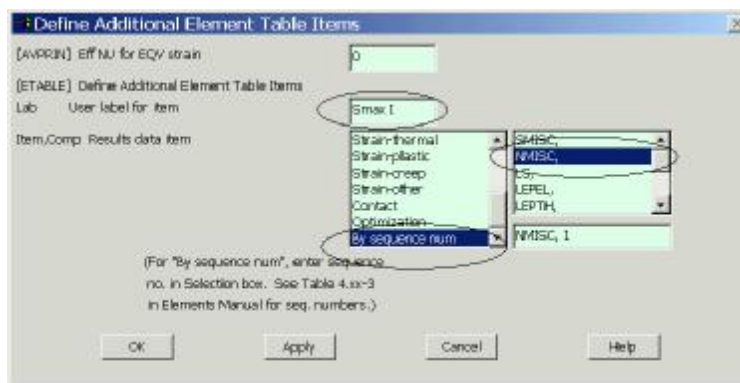


图 7-12 提取 I 节点最大应力

注意：

Nmisc,1 表示最大应力！

现在，需要将所得数据按照降序排列找到最大值。将 I 节点最大应力数据按照降序重新排序方便数据提取，其操作如下：

GUI: General Postproc > List Results > Sorted Listing > Sort Elms

在弹出 Sort Elements 对话框，将 SMAX_I 数据按照降序排列（如图 7-13 所示）。

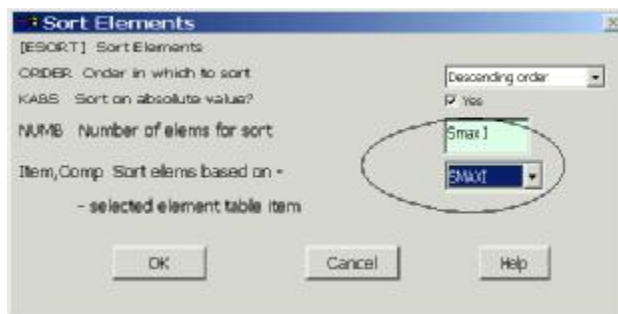


图 7-13 降序排列 I 节点最大应力

数据提取完毕，下面将 I 节点最大应力定义为状态变量，其操作如下：

GUI: Utility Menu > Parameters > Get Scalar Data

在弹出对话框中，选择 Results Data 和 Other operations，如图 7-14 选择获取最大值



图 7-14 将 I 节点最大应力定义为状态变量

(2) 定义单元 J 节点的最大应力为状态变量

与提取单元 I 节点最大应力的操作过程类似, 首先添加变量表示 J 节点最大应力, 其操作如下:

GUI: General Postproc > Element Table > Define Table > Add...

将数据保存为SMAX J(前边是SMAX I),在单元数据栏中键入NMISC,3(前面是NMISC, 1)(如图 7-15 所示)。这样设置得到 J 节点最大应力。

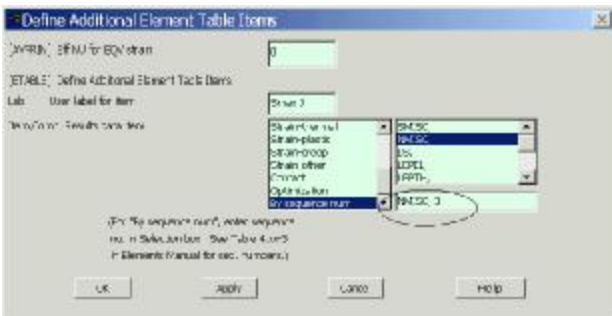


图 7-15 提取 J 节点最大应力

将 J 节点最大应力数据按照降序重新排序, 将应力数据按照降序排列方便数据提取, 其操作如下:

GUI: General Postproc > List Results > Sorted Listing > Sort Elms

在项目栏中选择 SMAX J (如图 7-16 所示)。

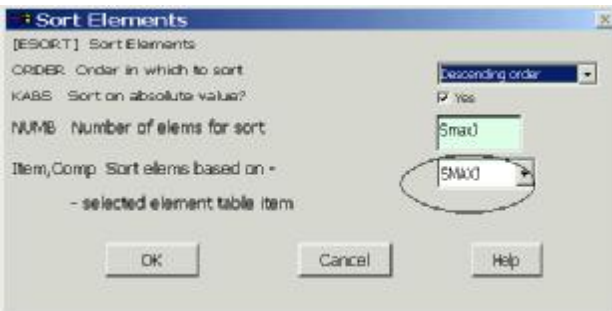


图 7-16 降序排列 J 节点最大应力

同理, 将 J 节点最大应力定义为状态变量, 其操作如下:

GUI: Utility Menu > Parameters > Get Scalar Data

在弹出对话框中, 选择 Results Data 和 Other operations。在随后对话框中如图 7-14 设置, 只是参数名称改为 SMaxJ。

(3) 将单元节点的最大应力定义为状态变量

为了减少状态变量数目, 选择 I、J 节点中较大值为唯一的状态, 下面介绍如何将两个变量中较大的设定为状态变量。

定义最大应力, 即取 SMAXJ 和 SMAXI 中最大值, 通过命令定义。在命令栏中键入:

SMAX=SMAXI > SMAXJ

此命令使两个值中最大的等于 SMAX。虽然本例中两个最大值相同, 然而, 并不是说其他结构分析中也是这样。如果在其他问题分析中必须指定最大应力!

3. 察看各个变量的初始值

通过查看优化变量的初始值 (最大应力数值) 是否满足约束条件, 操作如下:

GUI: Utility Menu > Parameters > Scalar Parameters

发现最大应力为 281.25, 远大于最大许用应力 200MPa (如图 7-17 所示)。下面, 在满足安全要求的同时对梁的体积进行优化。



图 7-17 查看变量值

5. 进入 OPT, 指定分析文件

到这里, 在 ANSYS 平台上, 已经完成了用梁的宽和高为参数构建了需要的问题模型, 现在准备求解优化模型。

1. 编辑命令流文件

需要在 ANSYS 命令流文件中简要描述需要分析的问题, 这样才能使 ANSYS 通过迭代求解优化模型。模型中变量的取值范围将下面定义, 通过 File 菜单的子菜单实现, 其操作如下:

GUI: Utility Menu > File > Write DB Log File...

在弹出对话框中给命令流文件键入一个名字: Optimize.txt。单击 OK 按钮。

在写字板 (Notepad) 中打开命令流文件, 显示类似下面情况:

```
/BATCH
!/COM, ANSYS RELEASE 7.0    UP20021010    16:10:03    05/26/2003
/input, start70, ans, C:\Program Files\Ansys Inc\v70\ANSYS\apdl\.,,,,,,,,,,,,,,1
```

```

/title, Design Optimization
*SET,W , 20
*SET,H , 20
/PREP7
K, 1, 0, 0, ,
K, 2, 1000, 0, ,
L, 1, 2
!*
HPTCREATE, LINE, 1, 0, RATI, 0.75,
!*
ET, 1, BEAM3
!*
!*
R, 1, W*H, (W*H**3)/12, H, , , ,
!*
!*
MPTEMP, , , , , , ,
MPTEMP, 1, 0
MPDATA, EX, 1, , 200000
MPDATA, PRXY, 1, , .3
!*
LESIZE, ALL, 100, , , , 1, , , 1,
LMESH, 1
FINISH
/SOL
!*
ANTYPE, 0
FLST, 2, 1, 3, ORDE, 1
FITEM, 2, 1
!*
/GO
DK, P51X, , , , 0, UX, UY, , , , ,
FLST, 2, 1, 3, ORDE, 1
FITEM, 2, 2
!*
/GO
DK, P51X, , , , 0, UY, , , , ,
FLST, 2, 1, 3, ORDE, 1
FITEM, 2, 3
!*

```

```

/GO
FK, P51X, FY, -2000
!/STATUS, SOLU
SOLVE
FINISH
/POST1
AVPRIN, 0, 0,
ETABLE, EVolume, VOLU,
!*
SSUM
!*
*GET, Volume, SSUM, , ITEM, EVOLUME
AVPRIN, 0, 0,
ETABLE, SMax_I, NMISC, 1
!*
ESORT, ETAB, SMAX_I, 0, 1, ,
!*
*GET, SMaxI, SORT, , MAX
AVPRIN, 0, 0,
ETABLE, SMax_J, NMISC, 3
!*
ESORT, ETAB, SMAX_J, 0, 1, ,
!*
*GET, SMaxJ, SORT, , MAX
*SET, SMAX, SMAXI > SMAXJ
!LGWRITE, optimization,, C:\Temp\, COMMENT

```

在着手开始优化问题之前，需要对文件进行一下小的修改，如果在实体建模过程中主要使用的是命令键入方式，那么大多数需要修改的地方已经完成了。然而，如果实体建模是通过图形用户界面（GUI）人机交互完成的，文件中会有很多命令记录的是单击图形的操作。因此必须找到实际操作进程，如命令 P51X 表示图形选择。要修改文件只需通过写字板打开然后进行所需的修改，一旦完成修改立即保存。下面是一些本例中需要修改的地方（需要修改的地方主要是通过 GUI 交互操作记录）：

```

第 32 行: DK,P51X, ,0, ,0,UX,UY, , , , ,
改为: DK,1, ,0, ,0,UX,UY,
此命令定义 1# 关键点的约束情况
第 37 行: DK,P51X, ,0, ,0,UY, , , , ,
改为: DK,1, ,0, ,0,UX,UY,
此命令定义 2# 关键点约束情况
第 42 行: FK,P51X,FY,-2000

```

改为: FK,3,FY,-2000

此命令表示在梁上施加载荷

另外, 还需要从文件中删除几行命令记录。如果, 已经删除了那些无用命令记录, 对文件修改感觉满意了那么保存命令流文件退出。

2. 将命令文件指定给优化分析

将命令文件指定为优化分析文件, 操作如下:

GUI: Main Menu > Design Opt > Analysis File > Assign

在文件列表中, 选择刚才建立的命令流文件名称, 单击 OK 按钮结束。

6. 声明优化变量

ANSYS 需要了解那些变量是优化模型中的关键参数, 即在定义变量之前需要事先了解那里参数对模型优化起作用。本例分析的目的是使梁最轻, 即使梁的体积最小。

注意:

如以前定义, 任何变量值均不能小于零!

设计变量已定义完毕, 下面需要定义每个变量的变化范围和允许误差。对于宽度和高度, 每个变量取值范围定为 10-50mm。因为梁的宽度或者高度任何一个变量很小的改变均对目标(梁的总重量)产生很大的影响, 这里取误差为 0.01mm。误差对 ANSYS 收敛影响很大, 误差是优化模型收敛所允许的参数最大变化范围。

应力变量的变化范围为 195 到 200MPa, 误差为 0.1MPa。因为体积变量为目标变量, 这里不需要定义体积的许可变化范围, 体积变量允许误差为 200mm³。为什么取这么大? 这个误差相对于体积的初始值 400000mm³ (20mm×20mm×1000mm) 已经很小(对于工程问题需要考虑的只能是相对变化量)。各变量的声明过程如下所示:

1. 声明设计变量

其操作如下:

GUI: Main Menu > Design Opt > Design Variables > Add

依图 7-18 定义梁的高度范围和误差。

命令: OPVAR, H, DV, 10, 50, 0.001

重复上述过程, 定义梁的宽度范围和误差。

命令: OPVAR, W, DV, 10, 50, 0.001

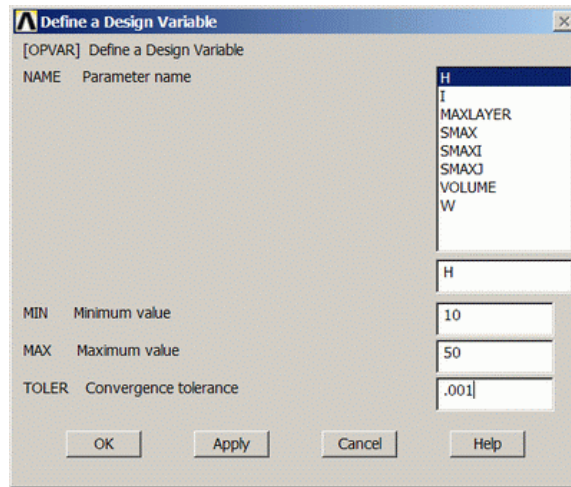


图 7-18 定义梁的高度

2. 声明状态变量

设置应力许可变化范围，操作如下：

GUI: Main Menu > Design Opt > State Variables > Add

在对话框中（如图 7-19 所示）填写/选择下面选项，在变量名栏键入“SMAX”，键入下限“MIN=195”，键入上限“MAX=200”，允许误差“TOLER=0.001”。

命令: OPVAR, SMAX, SV, 195, 200, 0.001



图 7-19 定义状态变量

3. 声明优化变量

进入目标设定函数对话框指定目标变量，其操作如下：

GUI: Main Menu > Design Opt > Objective

在变量名栏键入“Volume”，在收敛误差（Convergence tolerance）栏键入“200”（如图 7-20 所示）。单击 OK 按钮。

命令：OPVAR, VOLUME, OBJ, , , 200

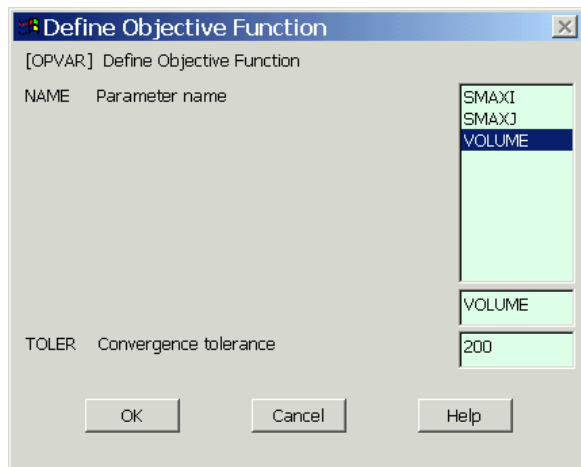


图 7-20 声明优化变量

7. 选择优化工具/优化方法

ANSYS 提供了几种优化方法可供问题优化求解。为确保优化结果不是局部最小值，相对较好的办法就是通过不同的方法进行优化对比结果数据。如果所面对的优化问题是自己不熟悉的，那么采用不同的优化方法求解然后对结果数据进行对比是发现优化模型是否正确的一个好方法。本例所分析的问题比较简单，采用 First-Order Solution 法，其操作如下：

GUI: Main Menu > Design Opt > Method / Tool

在选择优化方法对话框中，选择 First-Order 法。单击 OK 按钮。在弹出的 Controls for First-order Optimization 对话框中，最大迭代次数（Maximum iterations）栏中键入“30”（NITR=30），Percent step size SIZE 栏键入“100”，Percent forward diff. DELTA 栏键入“0.2”。单击 OK 按钮。

注意：

NITR: 最大迭代次数，ANSYS 系统默认值为 10。

SIZE: 沿每条线搜索时后步长步长与上一步步长的百分比。ANSYS 系统默认值为 100 %。

DELTA: 设计变量计算梯度是向前差分百分比。ANSYS 系统默认值为 0.2 %。

8. 指定优化循环控制进行优化

优化分析所需条件设定完毕开始优化，其操作如下：

GUI: Main Menu > Design Opt > Run.

在开始进行优化分析（Begin Execution of Run）对话框中确认分析文件，理论方法类型及最大迭代次数是否正确。单击 OK 按钮。

一般的优化问题只需一会儿就回收敛。本例中所分析的问题只需进行 19 次迭代也就是大约 10 分钟就收敛了。

9. 察看优化分析结果

在这里察看各参数最终结果，判断结果是否比初始值更优越。下面介绍优化分析结果的查看过程：

1. 显示各参数：

其操作如下：

GUI: Utility Menu > Parameters > Scalar Parameters...

在参数显示对话框中，可以看到梁的宽度为 13.24mm，高度为 29.16mm，最大应力等于 199.83MPa，总体积为 386100mm³。

2. 察看各个参数收敛过程中的变化曲线

这里主要是显示梁的高度和宽度随迭代次数变化的曲线，操作过程如下所示：

(1) 首先选择参数变量

其操作如下：

GUI: Main Menu > Design Opt > Design Sets > Graphs / Tables...

依图 7-21 完成操作获取梁的宽度和高度随迭代次数的变化曲线：X 轴变量参数选择 Set number, Y 轴变量参数 H（高度）和 W（宽度），绘图（Graph）栏选择 Graph PLVAR。

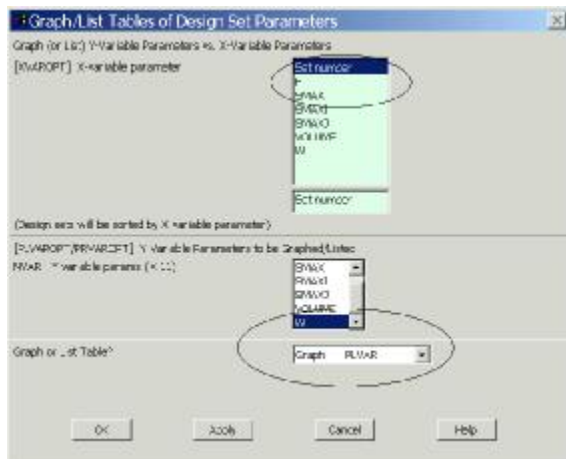


图 7-21 绘制宽度和高度变化图设置

(2) 修改显示坐标，显示 H、W 参数随迭代变化曲线

现在可以详细定义 X 轴和 Y 轴参数。首先进入修改坐标轴，操作如下：

GUI: Utility Menu > PlotCtrls > Style > Graphs > Modify Axes...

在弹出对话框中，键入 X 轴参数（迭代次数）值，在 Y 轴参数栏键入宽度和高度（单位为 mm）。单击 OK 按钮

(3) 显示 H/W-迭代变化图形

显示分析结果，操作如下：

GUI: Utility Menu > PlotCtrls

在图形显示对话框中，看到梁的宽度和高度随优化分析过程的变化情况（随迭代次数变化）（如图 7-22 所示）。如果，想将图形打印出来，可以通过菜单中的硬拷贝实现，即 GUI:

Utility Menu > PlotCtrls > Hard Copy...

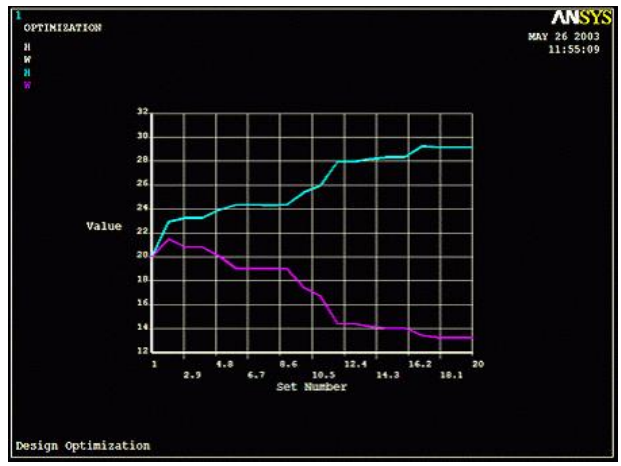


图 7-22 宽度和高度随迭代次数变化图

重复上述步骤，还可以将其他参数也用图形显示出来。不仅是宽度和高度，通过上述操作可以得到任何参数的变化图形。另外，如果对优化数据比较感兴趣也可以将数据列表显示（GUI: Main Menu > Design Opt > Design Sets > List...）。还有，优化分析的结果数据（比如应力，应变，弯矩等等）都能通过通用后处理菜单（General Postproc menu）处理。

10. 命令流求解

ANSYS 命令流（ANSYS Command Listing）:

```
/prep7                                !进入前处理
/title, Design Optimization          !添加标题
!定义独立变量
*set, H, 20                           !初始高度为20mm
*set, W, 20                           !初始宽度为20mm
!独立变量定义完毕
K, 1, 0, 0                            !通过坐标定义关键点
K, 2, 1000, 0
L, 1, 2                               !由点定义线
HPTCREATE, LINE, 1, 0, RATI, .75,    !定义HardPoint，梁3/4处
ET, 1, BEAM3                          !单元类型
R, 1, W*H, (W*H**3)/12, H, , , ,    !定义实常数：面积, I（注意是 **，不是 ^），高度
MP, EX, 1, 200000                    !弹性模量
MP, PRXY, 1, 0.3                     !泊松比
ESIZE, 100                           !网格尺寸
LMESH, ALL                            !划分网格
FINISH                                !退出前处理
/SOLU                                 !进入求解状态
```

```

ANTYPE, 0                                !定义分析类型：静力分析
DK, 1, UX, 0                             !定义1#关键点约束（限制其x，y轴方向位移）
DK, 1, UY, 0
DK, 2, UY, 0                             !定义2#关键点约束（UY）
FK, 3, FY, -2000                         !在硬点上定义外力载荷
SOLVE                                    !求解
FINISH                                    !退出求解
/POST1                                    !进入通用后处理
ETABLE, EVolume, VOLU,                   !定义单个单元体积
SSUM                                      !体积求和
*GET, Volume, SSUM, , ITEM, EVOLUME      !将梁的总体积定义为参数，命名为Evolume
ETABLE, SMAX_I, NMISC, 1                 !将I节点最大应力定义为参数，命名为SMaxI
ESORT, ETAB, SMAX_I, 0, 1, ,
*GET, SMAXI, SORT, , MAX
ETABLE, SMAX_J, NMISC, 3                 !将J节点最大应力定义为参数，命名为SmaxJ
ESORT, ETAB, SMAX_J, 0, 1, ,
*GET, SMAXJ, SORT, , MAX
*SET, SMAX, SMAXI > SMAXJ                !将最大 应力定义为参数，命名为SMax
LGWRITE, optimize, txt, D:\ANSYS Works\optimize.txt    !将logfile 保存在D:\ANSYS Works
\optimize.txt
/OPT                                      !进入优化设置
OPANL, optimize, txt, D:\ANSYS Works    !将optimize.txt 作为分析文件
OPVAR, H, DV, 10, 50, 0.001             !高度设计变量，下限10 mm，上限50 mm，允许误差 0.001mm
OPVAR, W, DV, 10, 50, 0.001             !宽度设计变量，下限 10 mm，上限50 mm，允许 0.001mm
OPVAR, SMAX, SV, 195, 200, 0.001        !应力变量，下限 195 MPa, 上限200 MPa，允许误差 0.001 MPa
OPVAR, VOLUME, OBJ, , , 200             !体积为目标变量，允许误差 200 mm2
OPTYPE, FIRS                             !First-order分析
OPFRST, 30, 100, 0.2,                   !最大迭代次数, Percent step size, Percent forward
difference
OPEXE                                    !优化分析
PLVAROPT, H, W                           !图示优化数据
/AXLAB, X, Number of Iterations
/AXLAB, Y, Width and Height
/REPLOT

```

11. 实例总结

1. 关于建模的总结

掌握基本的建模操作，特别注意掌握定义刚性点的操作。

2. 关于优化的总结

掌握利用单元列表定义参数的操作；掌握数据排序的操作；掌握分析文件生成过程中的

命令流整理规则；掌握声明优化变量的操作。

3. 关于查看分析结果的总结

通过定义参数，查看各个参数间变化关系。

7.2 拓扑优化

7.2.1 拓扑优化简介

拓扑优化是指形状优化，有时也称为外形优化。拓扑优化的目的是寻找承受单载荷或者多载荷的物体的最佳的材料分配方案。这种优化在拓扑优化中表现为“最大刚度”设计。

与传统的优化不同的是，拓扑优化不需要给出参数和设计变量的定义。目标函数、状态变量和设计变量都是预定好的。用户只需给出结构的参数（如材料属性、模型、载荷等）和要省去的材料百分比。

拓扑优化的目标——目标函数是在满足结构的约束情况下减少结构的变形能。减少结构的变形能相当于提高结构的刚度。这个技术通过使用设计变量给每个有限元的单元赋予内部伪密度得以实现。这些伪密度用 PLNSOL、TOPO 命令绘出。

例如在给出在给定载荷并满足最大刚度准则要求下省去 60% 的材料，图 7-23（a）所示为模型的载荷和边界条件，图 7-23（b）所示为以密度云图形式绘制的拓扑优化结果。

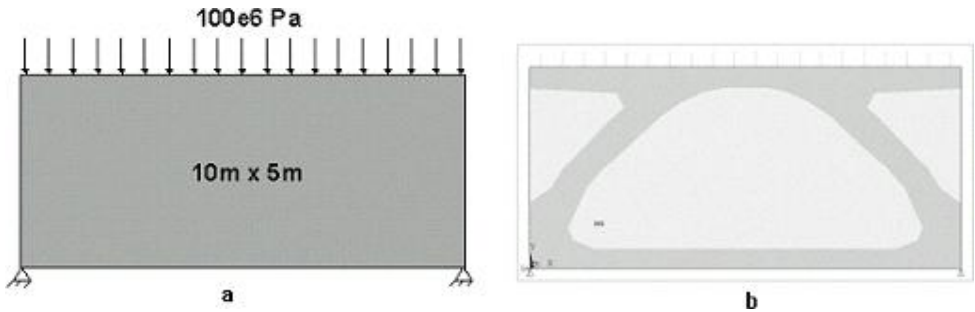


图 7-23 体积减少 70% 的拓扑优化示例

7.2.2 拓扑优化的主要步骤

拓扑优化主要包括以下主要步骤：首先是定义拓扑优化问题，选择单元，接着指定要优化的和不要优化的区域，定义和控制载荷工况，定义和控制优化过程，最后是查看优化分析结果。下面介绍拓扑优化的过程，并在过程中讲述关于命令流方式和 GUI 方式的不同。

1. 定义拓扑优化问题

定义拓扑优化问题与其他类型的问题方式一样。用户需要定义材料属性（弹性模型和泊松比），选择合理的单元类型并生成有限元模型，施加载荷并定义约束条件、单载荷或者多载荷分析。

2. 选择单元

拓扑优化功能可以使用二维平面单元，三维块单元和壳单元。要进行拓扑优化，模型中只能有下列单元类型：

二维实体单元：SOLID2 和 SOLID82

三维实体单元：SOLID92 和 SOLID95

壳单元：SHELL93

在这里二维平面单元主要用于平面应力问题优化。

3. 指定要优化和不要优化的区域

拓扑优化中有一个特点：只有 1# 单元区域进行拓扑优化。因此可以通过拓扑优化的这种特性来控制模型的区域，指定需要优化和不需要优化的区域。例如，如果需要保留接近圆孔部分或者支架部分（如果这部分进行拓扑优化，则后果可能是结果变得不安全，因此尽量避免）材料，将这部分单元类型号指定为 2# 或者更大序号的单元即可。定义优化区域如下命令流所示：

```
...
ET, 1, SOLID92
ET, 1, SOLID92
...
TYPE, 1
VSEL, S, NUM, , 1, , 2      !这些单元所在实体部分将被优化
VMESH, ALL
TYPE, 2
VSEL, S, NUM, , 3          !这些单元所在实体部分保持原样
VMESH, ALL
...
```

用户可以使用 ANSYS 的选择和修改命令里控制单元划分和类型号指定，保证优化意图得到贯彻。

4. 定义和控制载荷工况

拓扑优化对于载荷数目没有限制，用户可以在单载荷下进行优化也可以在多载荷下进行优化，单载荷属于拓扑优化中最简单的情况。

要是在多个独立的载荷工况中得到优化结果，必须用到写载荷工况和求解功能。在定义完毕每个载荷工况后，要用 LSWRITE 命令将数据写入文件，然后用 LSSOLVE 命令求解载荷工况的集合。

例如，下面的键入演示如何将三个载荷工况联合作为一个拓扑优化分析：

```
...
D, 10, ALL, 0, , 20, 1      !定义第一个载荷工况的约束和载荷
NSEL, S, LOC, Y, 0
SF,
```

```

ALISEL
LSWRITE, 1           !写入第一个载荷工况
DDEL
SFDEL
NSEL, S, LOC, X, 0.1
D, ALL, ALL, 0
NSEL, ALL
F, 212, FX
LSWRITE, 2           !写入第二个载荷工况
...
LSWRITE, 3           !写入第三个载荷工况
...
FINISH
/SOLUTION
TOPDEF, 10, 3        !定义优化的参数
LSSOLVE, 1, 3, 1     !在拓扑优化之前做全部三个载荷工况求解
...

```

5. 定义和控制优化过程

拓扑优化过程包括两部分：定义优化参数和进行拓扑优化。用户可以采用两种方式进行拓扑优化，即控制并执行每一次迭代或者自动进行多次迭代。

ANSYS 有三个命令定义和执行拓扑优化：TODEF, TOEXE 和 TOLOOP。TODEF 命令定义要生取得材料量，要处理载荷工况的数目，收敛允许误差。TOEXE 命令执行一次优化迭代。TOPLOOP 命令执行多次优化迭代。下面介绍各个命令及其应用：

1. 执行单次迭代

命令：TOEXE

GUI：无

定义好优化参数后，可以执行一次迭代。迭代后用户可以查看收敛情况并绘制出或者列出当前拓扑优化的结果。如果结果不是很满意，则还可以继续执行命令指定结果满意为止。如果在 GUI 方式下执行，可以在 Topological Optimization 对话框 (ITER 域) 中选择一次迭代。

通过此命令可以进行收敛测试，其精确度有 TODEF 确定。下面通过例子说明如何在拓扑优化中每次执行一次迭代：

```

...
/SOLUTION           !求解
TOPDEF, 25, 1       !移除25%的体积并处理一个载荷工况
SOLVE               !执行第一次应力分析
TOPEXE              !执行第一次拓扑优化迭代
FINISH
/POST1              !进入后处理器
PLNSOL, TOPO        !显示优化结果

```

```

*GET, TIPS RAT, TOPO, , CONV !第一期以拓扑收敛状态
*STATUS, , TOPSTAT          !列表显示拓扑优化结果
/SOLUTION
SOLVE                       !进行第二次应力分析
TOPEXE                      !执行第二次拓扑优化迭代
FINISH
/POST1
...

```

TOPEXE 的主要优点是可以提供更多的自由度，使用户可以设计自己的迭代宏进行自动优化循环和绘图。下面可以看到采用 TOLOOP 命令的宏，用来执行多次迭代优化。

2. 自动执行多次迭代

在定义好优化参数后，用户可以自动执行多次迭代。在迭代完成后，可以查看收敛情况并列出或者绘制出当前拓扑优化后的形状。如果需要，可以继续执行求解和迭代。TOLOOP 命令实际是一个 ANSYS 宏命令，可以进行复制和定制。下面介绍 TOLOOP 命令并举例子说明其应用。

命令：TOLOOP

GUI：Main Menu > Topological Opt > Run

下面的例子说明了如何使用 TOPLOOP 宏命令执行多次迭代：

```

...                               !定义第一个载荷工况
LSWRITE
...                               !定义第二个载荷工况
LSWRITE
...                               !定义第三个载荷工况
LSWRITE
...
TODEF, 80, 3, 0.001              !设定体积减少80%，3个载荷工况，0.001为收敛允许误差
...
/DSCALE, , OFF                  !关闭形状显示
/CONTOUR, , 3                   !每次显示3个轮廓数值
TOLOOP, 20, 1                   !最大20此迭代，每次迭代绘出拓扑优化结果

```

每次迭代执行一次 LSSOLVE 命令，一次 TOPEXE 命令和一次 PLNSOL, TOPO 显示命令。当收敛允许误差达到（收敛允许误差由 TODEF 定义）或者达到最大迭代次数（由 TOLOOP 定义）达到时优化迭代过程中止。

6. 查看优化分析结果

拓扑优化结束后，ANSYS 结果文件（jobname.rst）所存储优化结果通过后处理可以显示出来。需要显示优化结果，需要以下后处理命令：

- Ø 列出节点解或者/和绘制伪密度，使用 PRNSOL 和 PLNSOL 命令的 TOPO 变量
- Ø 列出单元解或者/和绘制伪密度，使用 PRESOL 和 PLESOL 命令的 TOPO 变量。

Ø 通过使用 ANSYS 表格功能查看优化结果

下面通过实例演示，如何通过 ANSYS 列表形式显示优化结果：

```
ETABLE, EDENS, TOPO
PLETAB, EDENS
PRETAB, EDENS
ESEL, S, ETAB, EDENS, 0.9, 1.0
EPLLOT
```

Ø 使用*GET 命令，查看最后一次迭代优化的收敛情况和结构变形能

```
*GET, TOPCV, TOPO, CONV      !如果TOPCV=1时收敛
*GET, ECOMP, UPO, , COMP     !显示 变形能 (ECOMP=变形能)
*START
```

7.2.3 拓扑优化实例

1. 教学目的

通过实例操作使读者了解拓扑优化的过程，更深入理解拓扑优化的含义，并具备进行简单拓扑优化的能力。希望读者在学习完本实例后，自己加强练习。

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 优化分析。

分析类型：拓扑优化分析。

单元类型：PLANE82

ANSYS 功能示例：实体建模包括基本的建模操作，布尔 Intersection 运算；施加均布载荷；工作平面移动；定义对称约束；映射方式显示拓扑优化结果；调整比例尺及图样。

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

如图 7-24 所示，一个六角形钢板在其短表面上承受拉力载荷。要求在确定此载荷下钢板重量减少一半时的合适形状。已知板的厚度为 10mm，弹性模量为 2.07e5Mpa，泊松比为 0.3，作用在短表面的压力为 50Mpa，方向如图 7-24 所示。

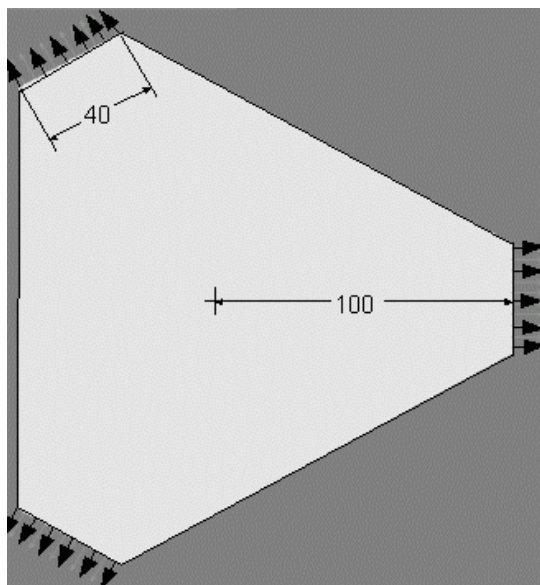


图 7-24 拓扑优化模型

3. 定义拓扑优化问题

拓扑优化问题的定义过程与一般问题分析没有多少差别，主要是建立有限元模型的过程，具体定义过程如下所示：

1. 改变工作名

其操作如下：

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

在 Change Jobname 对话框中键入新的工作名: Hexplate

命令: /FILNAM, Hexplate

2. 添加标题

其操作如下：

GUI: Utility Menu > File > Change Title

在改变标题对话框中键入新的标题。

3. 创建实体模型

对于本题所用的六角形钢板，需要通过两个多边形，然后使用布尔操作的 Intersection 取两个三角形的公共面，具体操作过程如下所示：

(1) 创建第一个三角形面

其操作如下：

GUI: Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Polygon > By Circumscr
Rad

在弹出的 Polygon By Circumscribed Radius 对话框中的 NSIDES 栏键入“3”，在 MAJRAD 栏键入“134.64”。单击 OK 按钮（如图 7-25 所示）。

命令: RPOLY, 3,, 134.64

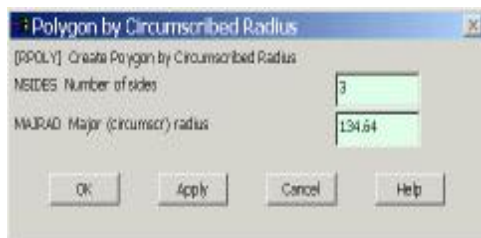


图 7-25 创建第一个三角形

然后在相反的方向创建另外以下三角形并通过 **Intersect** 命令取两个三角形的公共部分。在相反方向创建一个三角形，首先要移动工作平面。

(2) 转动工作平面

其操作如下：

GUI: Utility Menu > Work Plane > Offset Wp by Increment

在弹出的对话框中的 XY,YZ,ZX Angles 键入 “180,0,0”。单击 Apply 按钮。

命令: WPROT, 180, 0, 0

(3) 创建第二个三角形面

其操作如下：

GUI: Main Menu > Preprocessor > Modeling > Create > Areas > Polygon > By Circumscribed Radius

在弹出的 Polygon By Circumscribed Radius 对话框中的 NSIDES 栏键入 “3”，在 MinRAD 栏键入 “100”。单击 OK 按钮。

命令: RPOLY, 3, , , 100

(4) 取三角形面的公共部分

通过布尔操作中 **Intersect** 命令取两个三角形面的公共部分，其操作如下：

GUI: Processor > Modeling > Operate > Booleans > Intersect > common > areas > pick All
操作完毕得到如下六角形钢板（如图 7-26 所示）。

命令: AINA, ALL

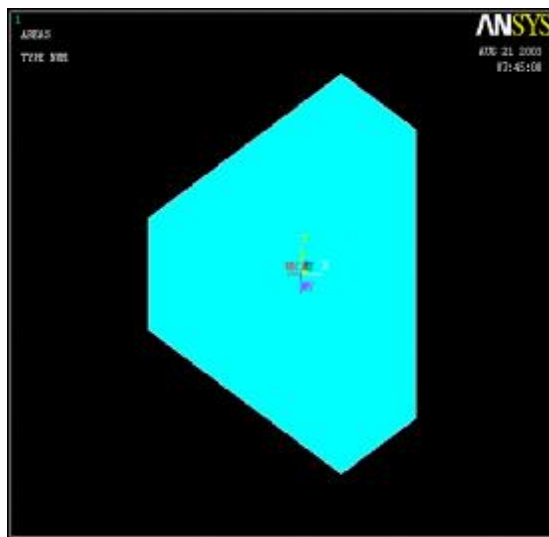


图 7-26 几何模型

(5) 选取模型的对称部分

模型上下对称，所以可以沿对称轴进行分割，只保留其中的一半即可。下面介绍如何沿对称轴分割模型，其选取过程如下所示：

1) 移动工作平面

GUI: Utility Menu > Work Plane > Offset Wp by Increment

在 **XYZ,ZX Angles** 栏键入 “0,90,0”。单击 **OK** 按钮。

命令: WPROT, 0, 90, 0

2) 将实体模型分割为对称的两部分

通过新的工作平面分割实体模型，操作如下：

GUI: Processor > Modeling > Operate > Booleans > Divide > area by Wrkplane > Pick All

通过此操作将实体模型从中间对称轴处分成两部分。

命令: ASBW, 3

3) 删除下侧一半实体

删除下侧一半只保留上侧一半，操作如下：

GUI: Processor > Delete > areas and Below

选择模型中轴线，单击 **OK** 按钮删除的下半部分。

命令: ADELE, 2, , , 1

上述操作完毕得到如图 7-27 所示模型。

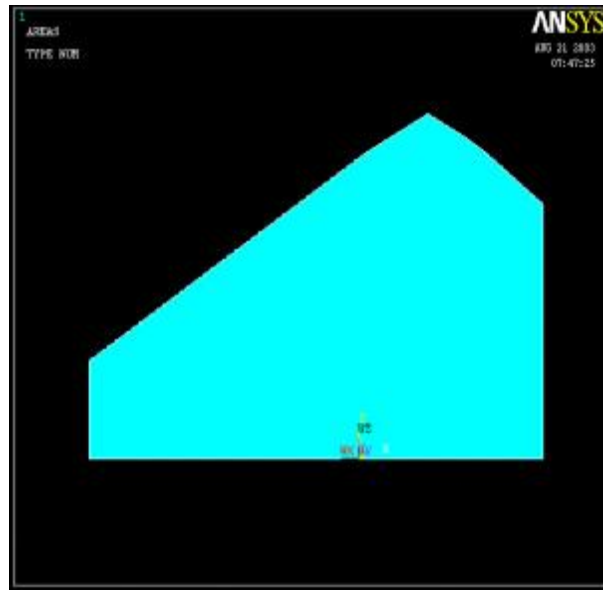


图 7-27 取对称模型的上半部分

4. 选择单元并定义实常数

选择单元，操作如下：

GUI: Main Menu > Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete

选择 PLANE82 单元。

命令: ET, 1, PLANE82

由于板有厚度，因此设置单元选项使在分析过程中考虑单元厚度。单击 Element Type 对话框中 Option。在弹出的对话框中选择 K3 为 Plane Strs w/th。单击 OK 按钮。单击 Close。

下面定义单元实常数，即单元厚度值，操作如下：

GUI: Processor > Real Constants > Add/Edit/Delete

单击 Add 按钮，在弹出对话框中键入单元厚度 10mm。

命令: R, 1, 10

5. 定义材料属性

定义材料的弹性模量和泊松比，操作如下：

GUI: Processor > Material Props > Structural > Linear > Elastic > Isotropic

在弹出的对话框中键入材料的弹性模量 EX 为 2.07e5，键入材料的泊松比 PRXY 为 0.3。

命令: MP, EX, 1, , 2.07E5

MP, PRXY, 1, , 0.3

6. 划分网格

由于模型比较简单，不要单独细分，因此采用 SmartSize 方式控制网格划分，其操作如下：

GUI: Processor > Meshing > MeshTool

在弹出 MeshTool 对话框中激活 SmartSize 并将其值设置为 3。单击 Mesh 按钮。在弹出的拾取对话框中单击 Pick All 按钮。

命令: SMRT, 3

AMESH, ALL

上述操作完毕, 得到的有限元模型如图 7-28 所示。

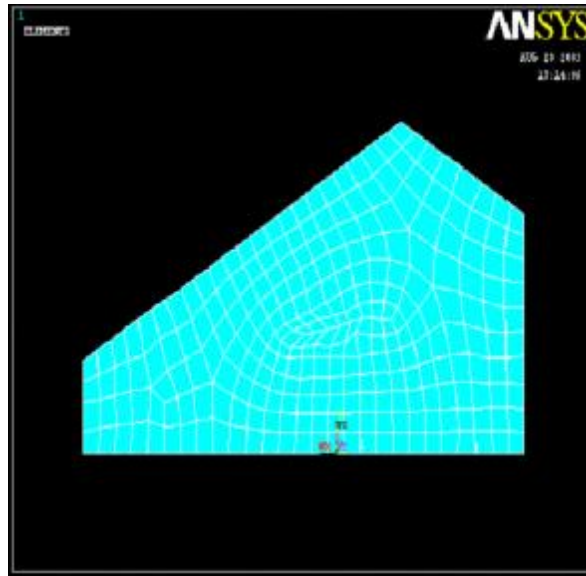


图 7-28 模型网格

7. 定义约束

由于实体模型及其载荷的对称性, 所以利用其对称性定义约束, 即在模型的底边定义对称约束, 定义模型约束的具体操作如下所示:

(1) 定义对称约束

其操作如下:

GUI: Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > Symmetry B.C > on Lines

选择底线, 单击 OK 按钮。

命令: DL, 3, , SYMM

单纯的对称约束还是不够, 需要定义实体模型几何中性的 UX 约束(思考为什么这样做), 保证实体不发生刚度运动。由于实体模型的对称性, 所以其当前工作平面坐标原点即几何中性, 所以在工作平面原点定义 UX 约束。

(2) 定义模型 UX 约束, 显示模型刚性运动

其操作如下:

GUI: Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On nodes
选择工作平面原点, 单击 OK 按钮。选择 UX 并单击 OK 按钮。

命令: D, 74, , , UX, , ,

8. 施加均布载荷

在实体模型短边上施加应力载荷, 操作如下:

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

选择最左侧线和最短线,单击 OK 按钮。在弹出对话框中的 Value 栏键入“-50”(为拉力,所以为负值)。模型载荷及其约束如图 7-29 所示。

命令: SFL, 2, PRES, -50

SFL, 7, PRES, -50



图 7-29 模型载荷及约束

4. 执行拓扑优化

各种条件均已具备,下面开始拓扑优化过程。首先设置拓扑优化控制选项,然后求解。求解过程大致需要 2~5 分钟(取决于计算机速度)。下面介绍拓扑优化的详细操作过程,如下所示:

1. 设置拓扑优化选项

这里需要告诉 ANSYS 载荷工况及需要减去的材料百分比,迭代次数及迭代误差。首先介绍载荷工况及材料减去百分比的设定:

(1) 设置载荷数工况数与材料减去百分比

首先设置基本拓扑优化选项,即定义载荷工况数及材料减小百分比,其操作如下:

GUI: Main Menu > Topological Opt > Set Up > Basic

在弹出的 Basic Topological Optimization 对话框的 Load case number 栏键入载荷工况数“1”。在 Percent volume reduct'n 栏键入材料减少百分比为“50”(如图 7-30 所示)。

命令: TOCOMP, SCOMP, SING, 1

TOVAR, VOLUME, CON, , 50



图 7-30 定义载荷工况数及材料减少百分比

(2) 定义收敛允许误差、迭代次数

设定收敛允许误差和迭代次数，其操作如下：

GUI: Main Menu > Topological Opt > Run

在弹出的 Basic Topological Optimization 对话框中的 TOTYPE 选项选择 Optimality 选项。

在 TODEF 栏键入收敛允许误差值为“0.0001”。在 TOLOOP 栏键入迭代次数“20”（如图 7-31 所示）。单击 OK 按钮。

命令: TOTYPE, OC

TODEF, 0.0001

TOLOOP, 20

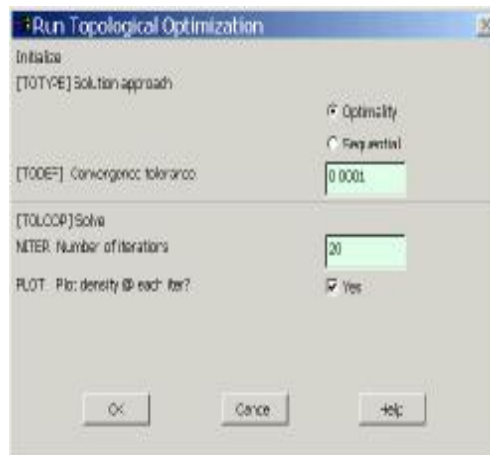


图 7-31 定义收敛允许误差和迭代次数

5. 查看拓扑优化结果

下面介绍拓扑优化结果的查看。为了显示分析结果，首先关闭位移比例尺、调整等值线间距查，并利用对称扩充图形查看完整的优化结果。下面介绍详细的操作过程：

1. 进入 POST1

其操作如下：

GUI: Main Menu > General Postproc

命令: /POST1

2. 关闭位移比例尺

其操作如下：

GUI: Utility Menu > PlotCtrls > Style > Displacement Scaling

命令: /DSCALE, 1, OFF

3. 调整等值线间距

其操作如下：

GUI: Utility Menu > PlotCtrls > Style > Contours > Uniform Contours

命令: /CONT, 1, 2, AUTO

4. 关闭图例

其操作如下：

GUI: Utility Menu > PlotCtrls > Window Controls > Window Options

命令: /PLOPTS, INFO, 0

上述操作完毕，得到拓扑优化结果如图 7-32 所示。

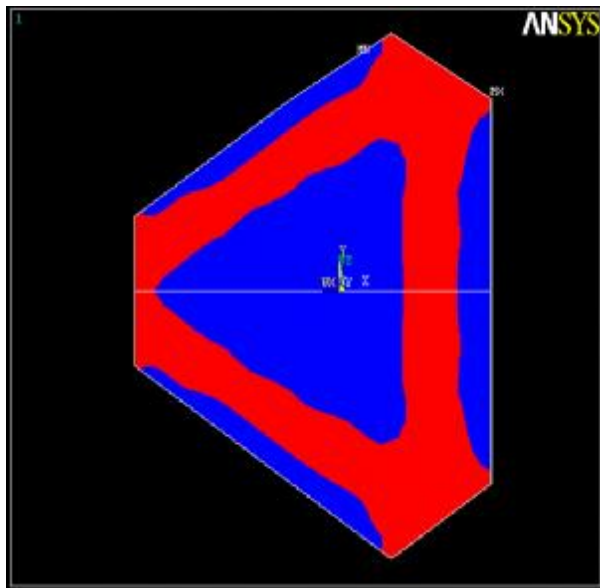


图 7-32 拓扑优化结果

6. 实例总结

1. 关于建模的总结

掌握基本的建模操作，掌握布尔 Intersection 操作，可以根据需要取多个面的公共部分；掌握各种工作平面移动的操作，可以根据需要旋转工作平面或者水平移动工作平面。

2. 关于施加载荷和求解的总结

掌握定义对称约束的操作，可以根据约束和结构的对称性合理的简化约束定义的操作过程；掌握拓扑优化分析各选项参数的设定。

3. 关于查看分析结果的总结

掌握以映射的方法查看结果的操作，方便利用对称性分析问题结果的查看。

7.3 本章小结

通过本章学习需要掌握以下内容：

- (1) 了解优化设计的基本概念，掌握主要步骤。
- (2) 了解常用优化技术及每种技术的适用范围。
- (3) 具备执行实际优化分析任务的能力，可以解决较为简单的优化问题。
- (4) 了解拓扑优化的基本概念，掌握拓扑优化主要步骤。
- (5) 熟练掌握拓扑优化的优化区域选择，可以根据优化目的灵活的选项优化区域。
- (6) 具备执行实际拓扑优化任务的能力，可以解决较为简单的拓扑优化问题。

学好、用好 ANSYS 的优化功能，需要首先从优化的基础知识开始了解，然后在补充专业内容的同时，加强实际操作练习，提高解决实际优化稳态的能力。

7.4 习题

1. 假定旅行者的花费为 10.00 元/小时，每公里汽油费用与速度平方成反比 ($50,000/\text{速度}^2$)，而汽油费用为 1.8 元/升。旅行的时间不超过 1 小时。求 50 公里旅程花费最小。

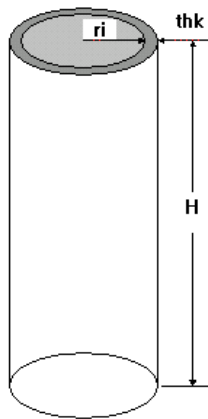
2. 风铃模型如习题图 7-1 所示。

材料的弹性模量为 10Epsi，密度为 $2.5\text{E-}4\text{lb-sec}^2/\text{in}^4$ 。

设计变量： $0.2 < r_i < 2.0$ (内径)， $0.05 < \text{thk} < 0.5$ (厚度)， $3 < H < 36$ (高度)

状态变量： $\text{fla} < 785\text{Hz}$ (频率上限)， $\text{flb} > 783\text{Hz}$ (频率下限)。

要求：在设计一个风铃，其一阶固有频率为 784Hz，并使风铃体积最小。



习题图 7-1 风铃体积优化模型

3. 悬臂梁模型如习题图 7-2 所示。

几何参数：悬臂梁长度 $L=10\text{m}$ ，高 $H=2.5\text{m}$ ，梁厚度为 0.1m 。距悬臂梁固定端 $l=6.5\text{m}$

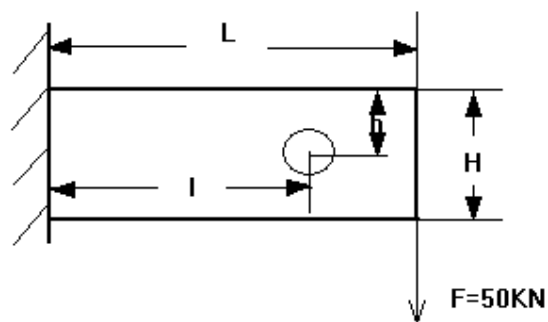
处有一个半径 $r=0.5\text{m}$ 的圆孔。

载荷：梁的右下角处承受一个集中载荷 $F=50\text{KN}$ ，

材料参数：弹性模量为 $3.08\text{e}3\text{MPa}$ ，泊松比为 0.3 。

要求：梁重量减少 30% 时，合适的形状。

提示：梁视为平面结构，采用平面应力单元进行分析。



习题图 7-2 平面梁拓扑优化模型