

## ANSYS 中的阻尼

阻尼是动力分析的一大特点，也是动力分析中的一个易于引起困惑之处，而且由于它只是影响动力响应的衰减，出了错不容易觉察。阻尼的本质和表现是相当复杂的，相应的模型也很多。ANSYS 提供了强大又丰富的阻尼输入，但也正以其强大和丰富使初学者容易发生迷惑这里介绍各种阻尼的数学模型在 ANSYS 中的实现，与在 ANSYS 中阻尼功能的使用。

### 1. 比例阻尼

最常用也是比较简单的阻尼大概是 Rayleigh 阻尼，又称为比例阻尼。它是多数实用动力分析的首选，对许多实际工程应用也是足够的。在 ANSYS 里，它就是  $\alpha$  阻尼与  $\beta$  阻尼之和，分别用 ALPHD 与 BETAD 命令输入。已知结构总阻尼比是  $\zeta$ ，则用两个频率点上  $\alpha$  阻尼与  $\beta$  阻尼产生的等效阻尼比之和与其相等，就可以求出近似的  $\alpha$  阻尼与  $\beta$  阻尼系数来用作输入：

$$\zeta = \frac{\alpha}{2\omega_1} + \frac{\beta\omega_1}{2} = \frac{\alpha}{2\omega_2} + \frac{\beta\omega_2}{2} \quad (5.1.1)$$

求比例阻尼系数的拟合公式

用方程组 (5.1.1) 可以得到  $\alpha$  阻尼与  $\beta$  阻尼系数值，然后用 ALPHD 与 BETAD 命令输入，这种阻尼输入既可以做 full（完全）法的分析，也可以作减缩法与振型叠加法的分析，都是一样的有效。

但是尽管  $\alpha$  阻尼与  $\beta$  阻尼概念简单明确，在使用中也要小心一些可能的误区。首先， $\alpha$  阻尼与质量有关，主要影响低阶振型，而  $\beta$  阻尼与刚度有关，主要影响高阶振型；如果要做的是非线性瞬态分析，同时刚度变化很大时，那么使用  $\beta$  阻尼很可能会造成收敛上的困难；一样的理由，有时在使用一些计算技巧时，比如行波效应分析的大质量法，加上了虚假的大人工质量，那么就不可以使用  $\alpha$  阻尼。同样，在模型里加上了刚性连接时，也应该检查一下  $\beta$  阻尼会不会造成一些虚假的计算结果。

### 2. 阻尼阵的计算

ANSYS 中有多种办法可以输入阻尼特性。先概括几个在结构分析中常用的输入阻尼的命令：

- ALPHAD: 输入  $\alpha$  阻尼参数
- BETAD: 输入  $\beta$  阻尼参数
- DMPRAT: 输入全结构的阻尼比  $\zeta$
- MDAMP: 输入与各频率的振型对应的模态阻尼比
- MP, DAMP 输入对应于某种材料的材料阻尼  $\square\square$ 。

与以上几种命令的输入对应的 ANSYS 计算的总阻尼阵  $[C]$  是：

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] + \frac{\alpha\zeta}{\xi} \frac{\ddot{\delta}}{f} [K] + \sum_{j=1}^m \dot{\alpha} \xi_j [K_j] + \sum_{k=1}^n \dot{\alpha} [C_k] \quad (5.1.2)$$

ANSYS 计算阻尼矩阵的公式

其中  $m$  是结构中有阻尼的材料种类数,  $n$  是具有特有阻尼的单元类型数。前两项是用  $\alpha$  与  $\beta$  定义的 Rayleigh 阻尼, 第三项是与全结构的阻尼比  $\zeta$  对应的阻尼阵, 第四项是材料阻尼, 最后一项是一些单元特有的单元阻尼阵。

### 3. 粘性阻尼比

粘性阻尼表现为类似物体在粘性流体中运动时的阻力, 与速度成正比。

$$F_v = c\dot{x} \quad (5.1.3)$$

粘性阻尼力

对单自由度系统,  $c$  就是粘性阻尼系数, 对多自由度系统, 就是阻尼矩阵  $[C]$ 。  $[C]$  是定义结构阻尼特性的最基本形式, 然而对粘性阻尼, 很少有直接定义阻尼阵  $[C]$  的, 阻尼比才是定义粘性阻尼最简捷的方法。在 ANSYS 中, 既可以定义在结构坐标系下的全结构阻尼比 (DMPRAT 命令), 也可以在模态坐标下对各个模态定义各自的模态阻尼比 (MDAMP 命令)。 ANSYS 最终计算的各模态相应的模态阻尼比是 MDAMP 定义的模态阻尼比与 DMPRAT 定义的全结构阻尼比的叠加。

DMPRAT 与 MDAMP 都是只对响应谱分析、谐分析及使用模态叠加法的瞬态分析有效, 它们所对应的阻尼阵  $[C]$  是随频率不同而变化的阻尼阵。已知模态阻尼比  $\zeta_i$  后, 则对应的阻尼阵  $[C]$  用下式求出:

$$\{\phi_i\}^T [C] \{\phi_i\} = 4\pi f_i \zeta_i \quad (5.1.4)$$

与输入的模态阻尼比对应的阻尼矩阵

其中  $\{\phi_i\}$  是第  $i$  个振型向量,  $f_i$  是对应的模态频率。

值得注意的是上述公式只有理论意义, 在振型叠加中是直接使用定义的振型阻尼比与全结构阻尼比, 没有哪个程序会用公式 (3) 去反求出阻尼阵来。(也许某些程序里可以反求出阻尼阵来, 但至少 ANSYS 没有这么做)。所以在做 Full (完全) 积分法的瞬态分析时, 用阻尼比定义的阻尼都被程序忽略掉了, 那么许多时候我们需要用一个全结构的阻尼比去做 full 法的瞬态分析计算时间, (如一些规范上规定某些结构可以用 0.005~0.05 的阻尼比做分析), 该怎么办呢? 这时候一个简单的办法是用  $\alpha$  阻尼与  $\beta$  阻尼来逼近一个常数阻尼比。

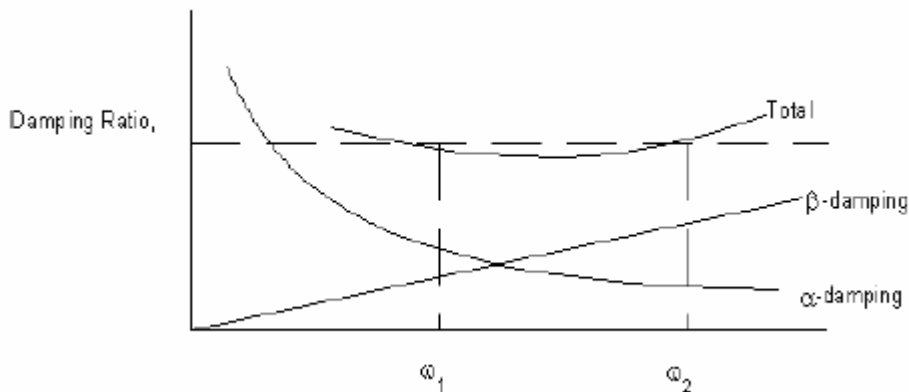


图 5.1 用 ALPHD 与 BETAD 来拟合常数阻尼比

选定 $\omega_1$ 与 $\omega_2$ ，就可以用公式（1）计算出做输入用的 ALPHD 与 BETAD 值来。

#### 4. 材料阻尼

与其它几种阻尼不同的是，材料阻尼是在材料参数里面进行定义的（命令：MP,DAMP），材料阻尼又叫滞回阻尼，其最显著的特点是与结构响应频率无关。

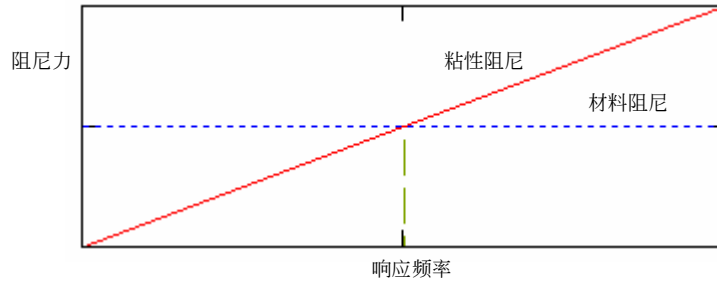


图 5.2 两种阻尼与频率的关系

许多文献上常把它写成复数刚度的形式： $k^* = k + i\xi$ 。其中  $k$  是结构刚度， $i = \sqrt{-1}$ ， $\xi$  称做材料阻尼系数（又叫结构阻尼系数）。

在单自由度情况，质量  $m$  做简谐振动时， $\xi \times \omega = c \times \omega$ （ $c$  是对应的粘性阻尼系数），因此得到  $\xi$  对应的阻尼比为：

$$\zeta = \frac{c}{c_{cr}} = \xi \times \sqrt{\frac{m}{k}} \times \frac{1}{2\sqrt{km}} = \frac{\xi}{2} \quad (5.1.5)$$

材料阻尼系数与粘性阻尼比的关系式

（在日本的结构减震规范中，用来定义阻尼的减衰系数就是此材料阻尼系数  $\xi$ 。）

在 ANSYS 里，它是刚度矩阵的乘子，产生的阻尼阵是各材料对应刚度的加权和。

$$[C]_{\text{材料阻尼}} = \sum_{j=1}^m \xi_j [K_j] \quad (5.1.6)$$

ANSYS 计算材料阻尼对应阻尼矩阵的公式

很明显，它对应的阻尼阵  $[C]$  是可以对角化的，所以既能在 full（完全）法瞬态分析中使用，也可以在振型叠加法分析中使用。上一小节里介绍了：ANSYS 在做 Full 积分的瞬态分析时，用阻尼比定义的阻尼都被程序忽略掉，在许多时候，已知的是粘性阻尼的阻尼比，又要做 full 法的瞬态分析，那怎么办？此时一种办法是把粘性阻尼比换算为材料阻尼系数再用 MP, DAMP 输入。材料阻尼系数与粘性阻尼比的换算关系是： $\xi = \frac{\zeta}{\pi f}$ ，在单自由度情况

下： $\xi = \frac{c}{k}$ （ $c$  是粘性阻尼系数）。

表 5.1 常见材料的材料阻尼系数

纯铝	钢	铅	铸铁
0.00002~0.002	0.001~0.008	0.008~0.014	0.003~0.03

天然橡胶	硬橡胶	玻璃	混凝土
0.1~0.3	1.0	0.0006~0.002	0.01~0.06

以上材料来自：《结构振动分析》，C.F.比尔茨（作者对其使用不负任何责任）

金属的阻尼是比较低的，不知道这算不算是钢结构的一个缺点。一般来说高阻尼的金属其强度延性硬度均低。但是也有例外，如锰铜合金其强度硬度延性阻尼都高，但是相应价格也很高。

### 5. 模态阻尼比的计算

当采用模态叠加法时，ANSYS 对模态阻尼比与结构阻尼比是直接使用的，对其它阻尼则是计算多种阻尼产生的模态阻尼比来计算各模态的响应。在各种阻尼输入下，ANSYS 程序计算出的第  $i$  个模态的总模态阻尼比是

$$\zeta_i^{total} = \frac{\alpha}{2\omega_i} + \frac{\beta\omega_i}{2} + \zeta + \zeta_i + \frac{\sum_{j=1}^M \dot{\alpha} \xi_j E_j}{\sum_{j=1}^M \dot{\alpha} E_j} \quad (5.1.7)$$

ANSYS 计算模态阻尼比的公式

其中前两项是  $\alpha$  阻尼与  $\beta$  阻尼对应的模态阻尼比，第三项是输入的全结构阻尼比，第四项是输入的模态阻尼比，最后一项是  $M$  种材料的材料阻尼系数  $\xi_j$  产生的模态阻尼比。其中  $E_j = \frac{1}{2} \{\phi_j\}^T [K] \{\phi_j\}$  是第  $j$  种材料对应的模态应变能，在日本减震规范中，就是采用此应变能公式来计算结构阻尼比的。

## M 注意：

如前所述，在做 Full 积分法的瞬态分析时，用阻尼比定义的阻尼都被 ANSYS 程序忽略掉了，所以同一个模型采用 full 法和模态叠加法的瞬态分析，ANSYS 计算采用的阻尼可能不一样，造成结果也有差别。

以下是结构分析中常用的几种阻尼输入的 ANSYS 命令流演示。

### 1) 用 MP,damp 来输入粘滞阻尼

DAMPRATO=0.025 ! 已知粘滞阻尼的阻尼比

LOSSMODM=2\*DAMPRATO ! 粘滞阻尼的阻尼比乘以 2 是等价的材料阻尼系数(日本规范的“减衰系数”)

CRITFREQ=2.6 ! 此为粘性阻尼等效为材料阻尼时的换算频率

```

MP_BETAD=DAMPRATO/(acos(-1)*CRITFREQ) ! 粘滞阻尼与频率有关
/prep7
mp,damp,1,MP_BETAD !定义 viscous damping, 与频率有关
/solu
antype,modal
modopt,lanb,1
! 要使模态计算考虑阻尼的影响, 必须用材料阻尼, 材料阻尼必须在求解前指定
! mxpand,,,,yes,选项! 阻尼比输入只在求出振型再叠加中才有用,
! ansys 不会把阻尼比还原计算为阻尼阵[C]的
mxpand,1,,,,yes
***
solve,

```

## 2) 用 MP,Damp 输入材料阻尼

```

DAMPRATO=0.025
LOSSMODM=2*DAMPRATO ! 材料阻尼系数, 书上给的一般是 LOSSMODM
/prep7
mp,damp,1,DAMPRATO !常数, 如果已知的是材料阻尼系数 LOSSMODM, 就要除以 2
/solu
antype,modal ! 使用模态叠加法
modopt,lanb,1
! important
mxpand,1,,,,yes
***
solve

```

## 3) 用 BETAD 输入粘滞阻尼 (振型叠加法)

```

! MSUP method with BETAD
! BETAD is damping_ratio/pi*f, even for MSUP
DAMPRATO=0.025 ! 阻尼比
LOSSMODM=2*DAMPRATO !等效的材料阻尼系数
/prep7
! mp,damp,1,DAMPRATO
BETAD,DAMPRATO/(acos(-1)*442) ! 注意此公式! 442 是你给定的频率值
/solu
antype,modal !模态分析

```

```
modopt,lanb,1
```

```
! important  
mxpand,1,,,yes  
lumpm,on  
,,,,  
solve  
/solu  
antype,harmic !谐分析  
hropt,msup  
hrout,on,off  
harfrq,FREQBEGN,FREQENDG  
,,,solve
```

#### 4) 使用 DMPRAT 定义的整体结构的常数阻尼比, (模态叠加法)

```
! MSUP method with DMPRAT  
! shows that DMPRAT is damping ratio  
DAMPRATO=0.025 ! 全结构阻尼比是 0.025  
LOSSMODM=2*DAMPRATO  
/prep7  
!mp,damp,1,DAMPRATO  
/solu  
antype,modal ! 先做无阻尼振型分解  
solve  
/solu  
antype,harmic  
hropt,msup  
hrout,on,off  
harfrq,FREQBEGN,FREQENDG  
nsubst,NUM_STEP  
kbc,1  
dmptrat,DAMPRATO ! 在这里定义此阻尼比, 常数  
,,,,,solve
```

#### 5) 用 MP, DAMP 定义粘性阻尼做 FULL 瞬态分析

! 粘性阻尼随频率增加而增加, 高频衰减快

```
! Full method with MP,DAMP
! shows that MP,DAMP with FULL is damping_ratio/pi*f
! As freq increases, damping is huge
```

```
DAMPRATO=0.025
LOSSMODM=2*DAMPRATO
CRITFREQ=480
MP_BETAD=DAMPRATO/(acos(-1)*CRITFREQ) ! 注意此公式
/prep7
mp,damp,1,MP_BETAD
```

## 6) 用 DMPRAT 定义全结构常数阻尼比

```
! Full method with DMPRAT
DAMPRATO=0.025
LOSSMODM=2*DAMPRATO
CRITFREQ=480
MP_BETAD=DAMPRATO/(acos(-1)*CRITFREQ)
/prep7
et,1,1
! mp,damp,1,MP_BETAD ! 如果用材料阻尼形式输入，就这样输入
dmpmat,DAMPRATO ! 常数阻尼比
/solu
antype,modal !带阻尼的振型分解
modopt,lanb,3
! important
mxpand,3,,,yes
lumpm,on
,,,
solve
/solu
antype,harmic
hropt,full ! full harmonic analysis
```

## 6. 单元阻尼

许多单元具有单元阻尼，单元阻尼都是在相关单元数据中输入。Ansys 中具有单元阻尼的单元有：

Beam4, Combin7, Link11, Combin14, Pipe16, Combin37, Fluid38, Combin40, Fluid79, Fluid80, Fluid81, Surf153, Surf154

还有用户自定义单元特性矩阵 Matrix27, 除了可以定义为质量与刚度阵外, 也一样可以定义为阻尼阵。在 Beam4 等单元中的单元阻尼数据已经在前面两章里介绍过了。这里简单介绍一下前面没有提到的几种单元的阻尼数据。

#### 1) COMBIN14 单元

ET,4,COMBIN14

R,4,10,0.01,0.02, !0.01 是阻尼系数, 0.02 是非线性阻尼系数

#### 7. 摩擦阻尼

常用的 Coulomb 阻尼模型是:

$$F_c = \mu_k F_N \quad (5.1.8)$$

Coulomb 模型的摩擦力计算公式

此阻力的符号与接触面相对运动的速度方向相反, 它与结构运动无关, 而与接触面上正压力大小和摩擦系数有关, 并且通常静摩擦系数和动摩擦系数是不一样的。在许多结构动力问题中, 摩擦阻尼是十分重要的, ANSYS 有许多种可以模拟摩擦的单元。然而, 带摩擦的分析一般是非线性分析。若不想做非线性分析, 一种线性化的近似办法是用摩擦力方程 Fourier 级数的第一项或前几项作为等代粘性阻尼输入。(摩擦阻尼的算例)

#### 8. ANSYS 的其它阻尼功能

流体阻尼,边界阻尼等。