

YJK 中减隔震体系等效阻尼比算法原理及选用

YJK 梅雨辰

一 引言

对于结构地震分析的振型分解反应谱法，反映结构自身耗能的阻尼比参数是影响反应谱曲线的重要因素。常规结构如纯混凝土结构或纯钢结构，由同种材料所构成，其各阶振型下阻尼比基本相等，根据试验及工程经验，多遇地震下，混凝土结构一般取 5%，钢结构根据楼层的高度其阻尼比一般在 2%~4% 之间。其阻尼模型最常见的有两种，一种是假定阻尼矩阵为质量矩阵 M 和刚度矩阵 K 的线性加权后的瑞利阻尼模型（多用于时程分析），一种是对各振型根据规范文献或试验定义各振型阻尼比的振型阻尼模型（多用于反应谱分析），这两种阻尼模型都可以很容易像质量和刚度一样进行振型对角化分解，分解形式如下：（满足下式的阻尼模型称为比例阻尼）

$$\phi^T C \phi = \begin{bmatrix} 2\xi_1 \omega_1 m_1 & & \\ & \ddots & \\ & & 2\xi_n \omega_n m_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中 ϕ 是结构的振型矩阵， C 是结构的阻尼矩阵， $\omega_i (i=1, \dots, n)$ 与 $\xi_i (i=1, \dots, n)$ 分别是结构各阶自振周期和阻尼比， $m_i (i=1, \dots, n)$ 是各阶振型的广义质量， $m_i = \psi_i^T M \psi_i$ ， ψ_i 是各阶振型向量。

但是对于减震与隔震结构，减隔震装置的摩擦耗能或者屈服耗能会产生附加的耗能，且其外力和位移一般不成线性关系，严格来说是要进行非线性时程分析才能精确模拟这种耗能的，考虑到地震波随机性大且动力弹塑性分析的计算成本高，反应谱的等效线性化分析也是规范认可的一种近似方法，该方法将减隔震装置实际抵抗变形的能力用恒定的有效刚度来替换，而其耗能归结为装置的有效阻尼（或有效阻尼比），这时整体结构等效阻尼比的确定是一个关键问题。然而减震器的有效阻尼和结构质量与刚度不成线性关系，结构阻尼矩阵一般不满足式(1)的比例阻尼条件，属于非比例阻尼体系，根据现有文献和规范，最新的 YJK4.2.0 完善了减隔震体系阻尼比的计算，对于等效阻尼比提供了两大类算法，一类是附加阻尼比法，结构的总阻尼比 ξ_i 等于不包含减隔震装置的主结构的阻尼比与减隔震装置对结构产生的附加阻尼比之和，附加阻尼比算法有几种，分布在上部结构计算和弹性时程分析中，在上部结构计算中包含强制解耦和能量法两种算法，被放置在实振型分解反应谱法菜单下，在弹性时程分析模块中有基于时程能量法和能量曲线比值法两种，详见下文；另一类基于非比例阻尼体系精确的复振型分解直接计算得到体系的阻尼比，当勾选复振型分解反应谱法时生效。下面具体来进行介绍。



二 实振型分解反应谱法的附加阻尼比算法

结构附加阻尼比方法一般用于消能减震体系，对于该类体系的等效阻尼比可由下式得到

$$\xi_i = \xi_{S_i} + \xi_{C_i} \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (2)$$

式中 ξ_{S_i} 表示主结构的阻尼比， ξ_{C_i} 表示减隔震装置的附加阻尼比
附加阻尼比 ξ_{C_i} 的算法在软件中有以下几种。

1 强制解耦法

该方法的本质基于阻尼矩阵的振型分解，当确定了各减隔震装置的有效阻尼系数后，结构的阻尼矩阵 \mathbf{C} 可写成主体结构的阻尼矩阵 \mathbf{C}_S 与减震装置的有效阻尼矩阵 \mathbf{C}_C 之和，并将其像式 (1) 一样进行分解，

$$\phi^T \mathbf{C} \phi = \phi^T \mathbf{C}_S \phi + \phi^T \mathbf{C}_C \phi = \underbrace{\begin{bmatrix} 2\xi_{S_1} \omega_1 m_1 & & \\ & \ddots & \\ & & 2\xi_{S_n} \omega_n m_n \end{bmatrix}}_{\text{主结构部分}} + \underbrace{\begin{bmatrix} \psi_1^T \mathbf{C}_C \psi_1 & \cdots & \psi_1^T \mathbf{C}_C \psi_n \\ \cdots & \cdots & \cdots \\ \psi_n^T \mathbf{C}_C \psi_1 & \cdots & \psi_n^T \mathbf{C}_C \psi_n \end{bmatrix}}_{\text{附加阻尼部分}} \quad (3)$$

式中 $\xi_{S_i} (i=1,2,\dots,n)$ 表示主结构的阻尼比， $\psi_i (i=1,2,\dots,n)$ 是各阶振型向量。

由于 (3) 式附加阻尼部分是个满阵，相互耦合阻碍了振型分解，强制解耦的核心思想是忽略其非对角元素，用附加阻尼比的对角矩阵来替代附加阻尼部分，如下

$$\phi^T \mathbf{C} \phi = \phi^T \mathbf{C}_S \phi + \phi^T \mathbf{C}_C \phi = \underbrace{\begin{bmatrix} 2\xi_{S_1} \omega_1 m_1 & & \\ & \ddots & \\ & & 2\xi_{S_n} \omega_n m_n \end{bmatrix}}_{\text{主结构部分}} + \underbrace{\begin{bmatrix} 2\xi_{C_1} \omega_1 m_1 & & \\ & \ddots & \\ & & 2\xi_{C_n} \omega_n m_n \end{bmatrix}}_{\text{附加阻尼部分}} \quad (4)$$

式中 $\xi_{C_i} (i=1,2,\dots,n)$ 表示待求的各振型的附加阻尼比，比较 (3) 式和 (4) 式的附加阻尼部分，可得

$$\xi_{C_i} = \frac{\psi_i^T \mathbf{C} \psi_i}{2\omega_i m_i} \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (5)$$

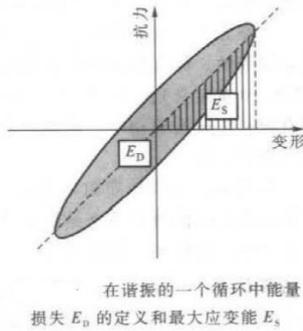
上式很清晰地表明一般情况下各振型具有不同的附加阻尼比。

上述强制解耦法出自国内外很多学术期刊，《GB 50011-2010建筑抗震规范》12.3.4条文说明将其称为“强行解耦”也给出了其计算公式，且表明当消能部件较均匀分布且阻尼比不大于0.2时，强行解耦与精确解的误差，大多数可控制在5%以内。

实际上该方法忽略了附加阻尼部分的非对角元素，相当于重新调整了阻尼矩阵的元素，其误差会随着消能部件的不均匀分布程度和附加阻尼比的增加而增加。因而《GB/T 51408-2021建筑隔震设计标准》对该算法给出了更严格的适用条件，明确当隔震层阻尼比小于10%，结构高度不超过24m、质量和刚度沿高度分布比较均匀且隔震支座类型单一的隔震建筑，可采用强制解耦法来求解，隔震层等效阻尼比的定义参见新隔标4.6.4，实际上一般隔震体系基本平动振型的阻尼比接近隔震层等效阻尼比，因而参考新隔标，一般消能结构体系阻尼比小于10%时，在工程中使用该方法其结果也是可靠的。

2 能量法-反应谱迭代

该方法是《GB 50011-2010建筑抗震设计规范》与《JGJ 297-2013建筑消能减震技术规程》共同规定的附加阻尼比算法，在减震结构设计中应用较为广泛，它基于如单自由度线性粘滞阻尼体系受简谐荷载阻尼耗能 E_D 、最大应变能 E_S 与阻尼比的关系得到，



可表示为下式

$$\xi_{Ci} = \sum_{j=1}^k W_{cj} / (2W_s) \quad (6)$$

式中： W_{cj} 表示第 j 个消能部件在结构预期层间位移下往复循环一周所消耗的能量 ($\text{kN}\cdot\text{m}$)， W_s 表示消能减震体系在水平地震作用下的总应变能 ($\text{kN}\cdot\text{m}$)， k 是消能器的数量。

不计及扭转影响时，总应变能 W_s ，可由下式得到

$$W_s = \frac{1}{2} \sum F_i u_i \quad (7)$$

式中： F_i 是质点 i 水平地震作用标准值， u_i 是质点 i 水平地震作用标准值下的位移 (m)。

阻尼器的耗能计算公式要区分位移型和速度型，对于速度型阻尼器，阻尼器的耗能可由下式确定

$$W_{cj} = \lambda_1 F_{dj\max} \Delta u_j \quad (8)$$

式中 λ_1 是阻尼指数的函数，可按下表确定， $F_{dj\max}$ 是第 j 个阻尼器在相应水平地震作用下的最大阻尼力 (KN)，对于反应谱分析可取 $F_{dj\max} = C(\omega \Delta u_j)^\alpha$ ， C 为阻尼器非线性参数中填的阻尼系数， α 为阻尼指数， ω 为结构的平动基本频率，当 X 向地震时，用 X 向基本频率， Y 向地震时，用 Y 向基本频率； Δu_j 为第 j 个消能器两端的相对水平位移 (m)。

阻尼指数 α	λ_1 值
0.25	3.7
0.50	3.5
0.75	3.3
1	3.1

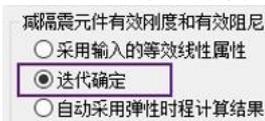
注：其他阻尼指数对应的 λ_1 值可线性插值。

对于位移型阻尼器，其耗能 W_{cj} 等于恢复力滞回环在相对水平位移 Δu_j 所围成的面积，写成表达式如下：

$$W_{cj} = \sum A_j \quad (9)$$

对于特定方向下的地震反应，该能量法不依赖于结构的各阶振型，而仅与结构和消能器总的水平位移和力相关，因而各阶振型的阻尼比是相同的，而对于隔震结构，一般前三周期隔震，导致了该方法一般不用于隔震结构阻尼比的计算。另外其计算公式与结构的位移和频率直接相关，通常情况下 X 向和 Y 向的位移和基本频率是不相同的，因而 X 向和 Y 向地震的附加阻尼比也是不同的。

需要说明的是，实际采用该方法计算阻尼比时，由于公式中减隔震体系及装置的位移是未知的，且与待计算的阻尼比相关，因而一般需要迭代来进行求解，当软件里勾选



软件会依据《JGJ 297- 2013 建筑消能减震技术规程》6.3.3 条文说明来进行迭代，其细节可参见该规范，如下：

1 假定各个消能器的设计参数和消能减震结构的总阻尼比 ζ 。

2 将消能减震结构的总阻尼比和各个消能器的设计参数代入分析模型中，根据现行国家标准《建筑抗震设计规范》GB 50011的规定，采用振型分解反应谱法进行结构分析。

3 经结构分析可得第 i 楼层的水平剪力 F_i 、水平地震作用标准值的位移 u_i 及第 j 个消能器的阻尼力 F_{dj} 及相对位移 Δu_{dj} 。

4 由式 (6.3.2-1)、式 (6.3.2-2)、式 (6.3.2-3)、式 (6.3.2-4) 和式 (6.3.2-5) 计算消能器附加给结构的有效阻尼比 ζ_d 。

5 重新修正各个消能器的设计参数，并利用下式计算消能减震结构的总阻尼比 ζ ：

$$\zeta = \zeta_1 + \zeta_d \quad (14)$$

式中： ζ_1 ——主体结构阻尼比；

ζ_d ——消能器附加给结构的有效阻尼比。

6 将步骤 5 计算得到的消能减震结构的总阻尼比和各个消能器的参数作为初始假设值，重复步骤 2~步骤 5。反复迭代，直至步骤 2 使用的消能减震结构的总阻尼比与步骤 5 计算得到的消能减震结构的总阻尼比接近。

软件的收敛准则为前后两次计算的总阻尼比的误差在 1% 及以内，此时停止迭代。

根据国内外一些学者的研究和工程经验，对于速度型阻尼器，该方法计算得到的附加阻尼比一般偏大^[4]，因为其基本公式是基于单自由度正弦波推导出来的，速度型阻尼器的耗能计算依赖于基本频率 ω ，实际输入的地震波是随机波，阻尼器也不可能沿高度均匀分布，当结构基本振型参与质量系数在 90% 以下或平扭耦合效应明显时，阻尼耗能由于最大位移和速度的近似将被夸大，因而地震响应下的附加有效阻尼比将有一定程度的高估。

3 能量法-时程计算

对于速度型阻尼器，上节的基于反应谱迭代的能量法其计算过程对速度进行了近似，造成了能量计算的误差，更精确的能量法计算是基于时程分析的结果。YJK 弹性时程的主菜单基于此输出结构附加阻尼比。



该能量法与上节的反应谱能量法的基本公式都是式 (6)，只是其能量用的是时程的结果。其应变能 W_s 如下：

$$W_s = \frac{1}{2} \sum |F_i(t)|_{\max} |u_i(t)|_{\max} \quad (10)$$

式中 $|F_i(t)|_{\max}$ 为整个地震持时中第 i 层剪力计算值的最大绝对值， $|u_i(t)|_{\max}$ 为整个地震持时中第 i 层层间位移计算值的最大绝对值。

其结果在附加阻尼比文本里输出

层-塔号	主方向楼层剪力	主方向层间位移	主方向应变能	次方向楼层剪力	次方向层间位移	次方向应变能
1-1	4019.952	0.006	11.800	16.418	0.001	0.004
2-1	3533.938	0.006	10.527	14.898	0.001	0.004
3-1	2849.786	0.006	8.051	11.706	0.001	0.003
4-1	1950.751	0.005	4.685	8.981	0.000	0.002
5-1	914.771	0.003	1.400	7.375	0.000	0.001

阻尼器耗能 W_{cj} 的形式也和反应谱一样，只是取值也是时程最大值，对于速度型阻尼器

$$W_{cj} = \lambda_1 |F_{dj}(t)|_{\max} |\Delta u_j(t)|_{\max} \quad (11)$$

式中 $|F_{d_j}(t)|_{\max}$ 为每个阻尼器的最大阻尼力， $|\Delta u_j(t)|_{\max}$ 取每个阻尼器的最大相对变形。

对于位移型阻尼器， W_{c_j} 取整个时程中每个阻尼器最大相对变形对应的点所形成的平行四边形的面积；

每个阻尼器耗能的 W_{c_j} 的计算结果软件也列于文本中

速度型阻尼器消耗能量 (Kn*m)	
阻尼器编号	耗能
1	4.557
2	0.002
3	4.079
4	0.006
5	5.145
6	0.003
7	0.008

在附加阻尼比结果文本最后按地震波的输入角度给出多条地震波下附加阻尼比的平均值，如下：

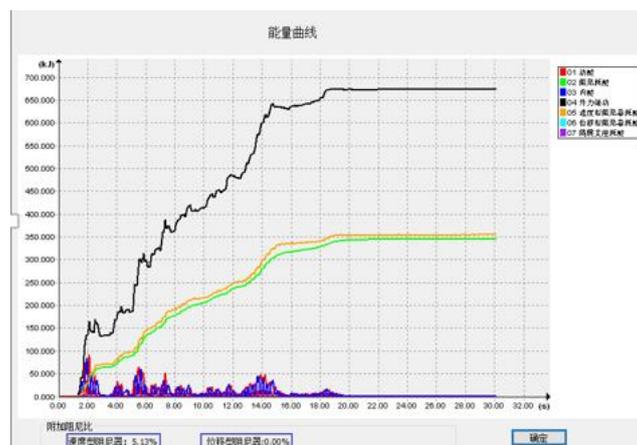
各工况附加阻尼比平均值统计
 全部0.0度地震波工况的附加阻尼比平均值: 8.16%
 全部90.0度地震波工况的附加阻尼比平均值: 7.09%

4 能量曲线比值法

YJK4.2.0 在弹性时程模块还提供了另一种工程中常用的附加阻尼比算法，其假定时程分析累积能量曲线的主结构耗能与阻尼器耗能的比值关系与两种能量相应的阻尼比比值相等，附加阻尼比公式如下：

$$\xi_c = \xi_s \frac{E_c(t)}{E_s(t)} \quad (12)$$

式中 ξ_s 是结构固有阻尼比， $E_s(t)$ 是地震响应最终时刻结构的固有阻尼的累积耗能，对应的是软件中的阻尼耗能标签， $E_c(t)$ 是地震响应最终时刻所有阻尼器的累积耗能，当结构既存在位移型又存在速度型时， $E_c(t)$ 为两者之和，软件为了直观，对于每条地震波的每个方向，分开输出位移型和速度型的附加阻尼比。



一般来说对于小震和中震，该能量比值法求得的附加阻尼比很多时候比按时程能量法要小，导致很多地方规范对于能量比值法规定的附加阻尼比折减系数要比能量法小，随着地震烈度增大，两者差距会减小，具体可参考文章[3]。

三 基于复振型分解的阻尼比计算方法

如上文所述，一般减隔震体系都是非比例阻尼体系，采用实振型分解不能直接进行解耦的原因是该体系的振型不是与质量和刚度相关的实数，而是与质量、刚度和阻尼都相关的复数，要进行解耦得到各振型下的阻尼比，需要在复振型下才能完成。复振型分解法过去多见于结构动力学相关书籍和文献，2021年《GB/T 51408-2021 建筑隔震设计标准》正式将该方法列为隔震结构模态分析的基本方法，下面介绍其计算阻尼比的详细过程。

具有非比例线性粘滞阻尼的一般结构，其动力方程如下^[1]：

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = F \quad (13)$$

式中 M 、 C 、 K 分别是体系的质量矩阵、阻尼矩阵（包含主结构阻尼和减隔震装置的有效阻尼）和刚度矩阵， U 是关于时间 t 的节点位移列向量函数， F 是关于时间 t 的动力荷载列向量。

引入辅助恒等方程 $M\dot{U} - M\dot{U} = 0$ ，可将其写成如下的关于状态向量 X 的一阶状态空间的形式，使表达式中的矩阵均为对称矩阵

$$R\dot{X} + DX = E \quad (14)$$

式中

$$X = \begin{bmatrix} \dot{U} \\ U \end{bmatrix} \quad R = \begin{bmatrix} 0 & M \\ M & C \end{bmatrix} \quad D = \begin{bmatrix} -M & 0 \\ 0 & K \end{bmatrix} \quad E = \begin{bmatrix} 0 \\ F \end{bmatrix}$$

求解上述特征矩阵 R 与 D 的广义特征值，可得 n 组共轭复特征值 $\mu_i, \bar{\mu}_i$ ($i=1, \dots, n$) 和 n 组共轭复振型 φ_i 和 $\bar{\varphi}_i$ ，特征值 $\mu_i, \bar{\mu}_i$ ($i=1, \dots, n$) 可由体系的无阻尼频率 ω_i 和阻尼比 ξ_i 表示为

$$\mu_i = -\xi_i \omega_i + i\omega_i \sqrt{1 - \xi_i^2}, \quad \bar{\mu}_i = -\xi_i \omega_i - i\omega_i \sqrt{1 - \xi_i^2} \quad (i=1, \dots, n) \quad (15)$$

由于 R 与 D 的对称性，可实现非比例阻尼体系振型的分解， M 和 C 、 M 和 K 关于复振型有正交关系，这里用 M 和 C 关于一对共轭复振型的正交关系：

$$(\mu_i + \bar{\mu}_i) \varphi_i^T M \bar{\varphi}_i + \varphi_i^T C \bar{\varphi}_i = 0 \quad (i=1, \dots, n) \quad (16)$$

可求得减隔震体系的各阶振型的阻尼比为

$$\xi_i = \frac{1}{2\omega_n} \frac{\varphi_i^T C \bar{\varphi}_i}{\varphi_i^T M \bar{\varphi}_i} \quad (i=1, \dots, n) \quad (17)$$

上述即为复振型法理论下直接求得减隔震体系的等效阻尼比的过程，和前面实振型两种算法相比，没有将主结构的阻尼比和减隔震装置附加阻尼比分离成两部分，而是整体进行求解的，当结构为比例阻尼时，振型 φ_i 和 $\bar{\varphi}_i$ 退化为相同的实振型，即使式 (14) 退化为式 (1) 的比例阻尼计算形式，因而传统的实振型阻尼比计算方法是复振型方法在比例阻尼下的特例。相较于人为重构阻尼的强制解耦法，复振型分解法计算过程没有引入任何人为假定，对线性粘滞阻尼体系，其阻尼比的结果为理论精确解；对于非线性体系，当合理确定其等效线性参数后，用复振型分解法计算亦是合理可靠的。

这里还要强调一点，采用复振型分解法得到的阻尼比是有可能比实振型的附加阻尼比算法得到更大的阻尼比，然而其振型叠加采用的复振型的 CCQC 公式不同于实振型 CQC 公式，其增加了振型速度相关系数和位移-速度相关系数，使得比起实振型要叠加更多的响应，因而复振型分解反应谱法求得的结构响应往往比传统的实振型反应谱法大，更接近减隔震体系非线性时程分析的结果。

四 不同减隔震体系下等效阻尼比算法的选用

1 速度线性阻尼器体系

速度线性阻尼器的阻尼力与速度成正比，比例系数是阻尼器的阻尼系数 C ，对于仅包含速度线性阻尼器的体系，其本质上是线性体系，阻尼器的有效阻尼就等于其阻尼系数。由于阻尼器的阻尼力直接和速度相关，这种体系用时程分析来计算附加阻尼比更合理可靠。当在弹性时程分析模块选用直接积分法，则可像纯弹性时程一样求解，不需要进行任

何迭代；选用振型叠加法，由于软件用的是实振型叠加法无法处理非比例阻尼矩阵，则仍然需要依靠 FNA 法迭代求解，实际计算时，两种方法都可选用，如果计算过程中出现不收敛的情况，可减小分析步长重新计算。计算完成后，用户可以在附加阻尼比文本里采用时程能量法的附加阻尼比的结果，X 向和 Y 向取较小值，和固有阻尼比相加后填入前处理地震信息的阻尼比一栏，具体细节参考《YJK 减震结构设计应用手册》，用户也可查看能量曲线中的单条波用能量比值法的附加阻尼比的结果，多条波手动进行附加阻尼比的平均或包络，或者趋于保守，取两种时程方法附加阻尼比的较小值，具体由用户来选择。

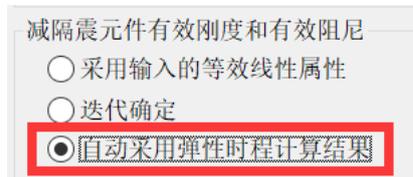
当阻尼器布置比较均匀，两个方向平动系数在 90% 及以上时，也可近似地选用反应谱的能量法来计算附加阻尼比，这时前处理勾选采用输入的等效线性参数，然后将阻尼器的阻尼系数直接填入其有效阻尼中，如下面的 3000，软件会用有效阻尼来计算阻尼器耗能 W_{cj} ，此时式 (8) 中的 λ_i 取为 π ，即线性阻尼器耗能公式，然后对结构位移进行迭代，直到位移收敛，输出其两个方向的附加阻尼比。



2 非线性粘滞阻尼器体系

非线性粘滞阻尼器的阻尼指数不为 1，即阻尼力与速度不成线性关系，属于非线性体系，首选用非线性时程来计算其附加阻尼比，此时无论在弹性时程选用直接积分法还是振型叠加法都需要对结构中的非线性部分进行逐时刻迭代求解，其余和速度线性阻尼器一样，可以选用弹性时程模块的时程能量法或能量曲线比值法的结果来作为反应谱分析的附加阻尼比。

当阻尼器布置比较均匀，两个方向平动系数在 90% 及以上时，也可像速度线性阻尼器一样用反应谱能量法来计算，不过为了得到可靠的有效阻尼，一般建议勾选自动采用弹性时程结果，如下：



此时软件会读取弹性时程直接积分法计算得到的等效刚度和等效阻尼系数，其等效阻尼系数利用下列时程的能量等效公式来计算：

$$C_{eff} = \frac{E_{in} - E_{elas}}{\int_0^t v^2 dt} \quad (18)$$

式中 E_{in} 指的是消能器总内能， E_{elas} 指的是消能器弹性应变能

3 位移型阻尼器体系

包含屈曲约束支撑（BRB）、软钢剪切消能器、摩擦型效能器和铅消能器等的位移型阻尼器一般都是依靠其在地震下屈服来达到耗能的效果的，一般用屈曲约束支撑或者塑性WEN单元来模拟，是包含初始刚度和屈服后刚度的非线性构件，如下：

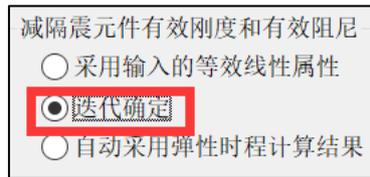
类型:	塑性单元(Wen)						
	有效刚度KE kN/m, kN.m/radCE (kN. s/m)	有效阻尼	非线性	刚度 K (kN/m)	屈服力 KY (kN)	屈服后 刚度比KYR	屈服指数 exp
<input type="checkbox"/> U1	0	0	<input type="checkbox"/>	0	0	0	0
<input checked="" type="checkbox"/> U2	600000	100	<input checked="" type="checkbox"/>	600000	300	0.1	10
<input type="checkbox"/> U3	0	0	<input checked="" type="checkbox"/>	0	0	0	0
<input type="checkbox"/> R1	0	0	<input type="checkbox"/>	0	0	0	0
<input type="checkbox"/> R2	0	0	<input type="checkbox"/>	0	0	0	0
<input type="checkbox"/> R3	0	0	<input type="checkbox"/>	0	0	0	0

其计算及设计一般要分为小震和中震，两者有不同的建议计算方法。

在小震下位移型阻尼器一般设计为弹性，不耗能，此时连接属性有效刚度填入结构的初始刚度，有效阻尼填0，勾选采用输入的等效线性属性，如下：



在中震下，位移型阻尼器屈服耗能，有效阻尼是一种能量等效概念，用阻尼器耗能来等效，阻尼比主要受到刚度的影响，而基于反应谱迭代的规范能量法对于刚度的合理性和可靠性是可以的。因而可以勾选迭代确定有效刚度和阻尼，程序会按照《JGJ 297- 2013 建筑消能减震技术规程》6.3.3 条文说明进行迭代，自动迭代出各个阻尼器的等效刚度和结构总阻尼比，实际填入的有效刚度和有效阻尼将不起作用。



4 隔震体系

对于橡胶支座是弹性构件，没有耗能不会产生附加阻尼；对于铅芯橡胶支座等屈服耗能的隔震支座（其参数设置如下），其耗能原理和位移型阻尼器一样，通过屈服构件的屈服来耗能，提供附加的阻尼。由于复振型分解法计算的整体隔震结构各阶振型的等效阻尼比与实际情况较符合，《GB/T 51408- 2021 建筑隔震设计标准》4.3.2 条明确规定了采用复振型分解反应谱法来进行隔震结构整体分析，其中隔震层的非线性可按等效线性化的迭代方式来考虑，即规范建议迭代确定有效刚度和阻尼，然后再用复振型分解反应谱法来计算结构阻尼比，这对于隔震支座在地震中不受拉力或拉力很小可忽略不计导致支座抗拉刚度影响较小时，这样的分析是合理可靠的。然而当支座出现拉力且其数值不可忽略时，反应谱等效线性体系以抗压刚度来作为支座的轴向刚度，无法考虑拉压刚度不同带来的影响，此时应以时程分析的结果为准，上部反应谱结果仅供参考。

类型:	隔震支座						设计参数
	有效刚度KE kN/m, kN·m/rad	有效阻尼 CE (kN·s/m)	非线性 K (kN/m)	刚度 K (kN/m)	抗拉刚度 Kt (kN/m)	截面积 A (m ²)	
<input checked="" type="checkbox"/> U1	5.3e+006	0	<input checked="" type="checkbox"/>	5.3e+006	530000	1.13	
<input checked="" type="checkbox"/> U2	3290	0	<input checked="" type="checkbox"/>	29170	250	0.077	屈服力KY (kN) 屈服后刚度比KYR
<input checked="" type="checkbox"/> U3	3290	0	<input checked="" type="checkbox"/>	29170	250	0.077	
<input type="checkbox"/> R1	0	0					
<input type="checkbox"/> R2	0	0					
<input type="checkbox"/> R3	0	0					

5 算法选用综合建议

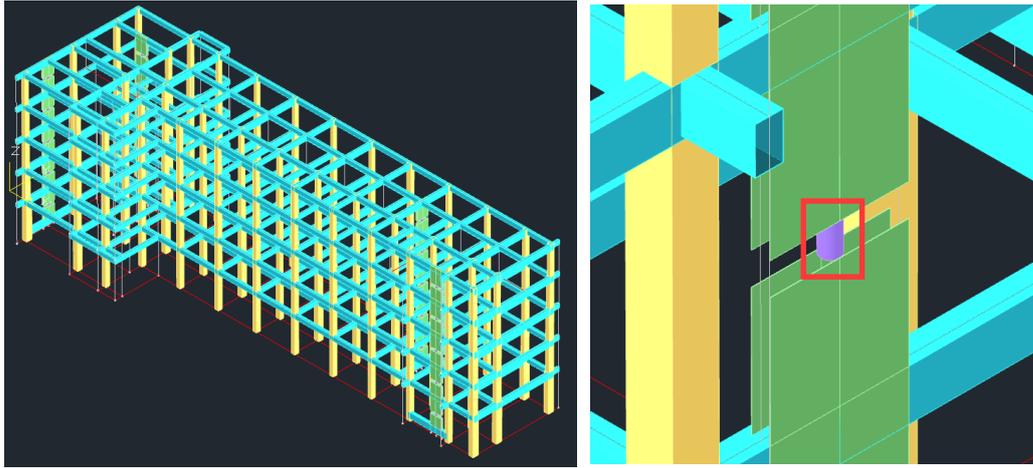
综上，上述各类减隔震体系等效阻尼比的推荐算法如下：

体系	等效阻尼比算法	有效刚度和有效阻尼确定方法
速度线性阻尼器	优先采用时程能量法 或能量曲线比值法	-
	也可采用反应谱能量法	采用输入的等效线性参数(有效刚度填 0)
非线性粘滞阻尼器	优先采用时程能量法 或能量曲线比值法	-
	也可采用反应谱能量法	自动采用弹性时程计算结果
位移型阻尼器	反应谱能量法	小震：采用输入的等效线性参数(有效阻尼填 0) 中震：迭代确定
隔震	复振型分解反应谱法	迭代确定

五 等效阻尼比合理性的校核

上面探讨了减隔震体系反应谱分析时等效阻尼比的算法及选用，由于减隔震体系的反应谱分析本来就是一种等效的近似计算过程，阻尼比计算的可靠性需要用非线性时程分析校核，当主体结构处于弹性状态，可以用弹性时程分析模块来进行减隔震体系的非线性分析，选用与规范反应谱接近的地震波进行时程计算，然后和反应谱计算得到的剪力进行比较，当两者结果接近时或反应谱略微大于时程时表明等效阻尼比是合理可靠的，当反应谱的剪力明显小于时程剪力时说明等效阻尼比取的过大，结构偏于不安全，这时需要返回前处理将最大附加阻尼比填小，来限制结构的计算阻尼比，重新计算，循环往复，直到与时程剪力接近为止。

下面通过一个算例来直观说明这个校核过程。选用一个 5 层高度约 20 米的墙式速度线性阻尼器结构模型，其阻尼器用斜杆建模。



设置 X 向和 Y 向两种不同的阻尼器，分别命名为 VFD-U3 和 VFD-U2，采用阻尼器麦克斯韦模型来模拟，连接属性设置如下：

VFD-U2 VFD-U3		类型： 阻尼器麦克斯韦					
	有效刚度KE kN/m, kN. m/rad	有效阻尼 CE (kN. s/m)	非线性 CE (kN. s/m)	刚度 K (kN/m)	阻尼 C (kN. s/m)	阻尼指数 exp	
<input type="checkbox"/> U1	0	0	<input type="checkbox"/>	0	0	0	
<input checked="" type="checkbox"/> U2	0	0	<input checked="" type="checkbox"/>	1e+006	5000	1	
<input type="checkbox"/> U3	0	0	<input type="checkbox"/>	0	0	0	

VFD-U2 VFD-U3		类型： 阻尼器麦克斯韦					
	有效刚度KE kN/m, kN. m/rad	有效阻尼 CE (kN. s/m)	非线性 CE (kN. s/m)	刚度 K (kN/m)	阻尼 C (kN. s/m)	阻尼指数 exp	
<input type="checkbox"/> U1	0	0	<input type="checkbox"/>	0	0	0	
<input type="checkbox"/> U2	0	0	<input checked="" type="checkbox"/>	0	0	0	
<input checked="" type="checkbox"/> U3	0	0	<input checked="" type="checkbox"/>	600000	3000	1	

然后前处理参数减震隔震页勾选采用输入的等效线性属性，先进行一遍实振型分解反应谱计算仅作为中间过程。选用时程计算的附加阻尼比方法，在弹性时程模块选择一条和规范谱拟合很好的人工波 ArtWave-RH2TG090,Tg(0.90)，工况定义中设置 0 度和 90 度两个方向，选择振型叠加法或者直接积分法，本例选择直接积分法，积分时步设置为 0.002s，如下：

工况信息

名称: ArtWave-RH2TG090,Tg(0.90) [0.0]

地震作用

地震波: ArtWave-RH2TG090,Tg(0.90)

主方向与X轴正向夹角(度): 0

时程分析

分析方法

振型叠加法 直接积分法

起始时间(s): 0 结束时间(s): 50.02

时间步长(s): 0.002 输出间隔步数: 10

输出间隔(s): 0.020 迭代控制参数...

工况组合中只输入主方向峰值加速度，其余设为 0，如下：

序号	恒载系数	活载系数	峰值加速度类型	主方向峰值加速度(cm/s ²)	次方向峰值加速度(cm/s ²)	竖方向峰值加速度(cm/s ²)
1	0.00	0.00	PGA	70.00	0.00	0.00

其时程模块两种附加阻尼比法的结果如下：

附加阻尼比算法	0 度方向附加阻尼比	90 度方向附加阻尼比
时程能量法	3.12%	4.47%
能量曲线比值法	3.26%	5.10%

可以发现在本算例下 X 向附加阻尼比要小于 Y 向的附加阻尼比，这与 X 向阻尼器的阻尼系数小于 Y 向是相符的。本算例时程能量法的附加阻尼比结果要小于能量曲线比值法，两者的 X 向附加阻尼比较接近，这里偏于安全，结构的附加阻尼比直接取时程能量法的结果 3.12%，考虑了附加阻尼比后，上部结构参数地震信息阻尼比填为 $5\%+3.12\%=8.12\%$ ，重新用实振型分解反应谱法计算。

得到反应谱下基底剪力的结果，并与之前的人工波弹性时程分析直接积分法剪力进行对比，并计算与时程剪力的相对误差，如下：

	X 向基底剪力	Y 向基底剪力
实振型分解反应谱法	5445.61	5100.71
时程分析	4935.89	4774.95
相对误差	10.33%	6.82%

从上表可以看出，反应谱的结果 X 向和 Y 向基底剪力皆比非线性时程分析的结果大，最大达到 10% 左右，其能包络时程剪力，计算结果偏于安全且略微偏大，可证明上述过程的附加阻尼比的取值是相对合适的。需要说明的是这里仅为了阐述过程，所以仅用了一条人工波，实际一般用三条波的包络或七条波的平均来计算附加阻尼比。

另外，需要强调的是，上面都是理论层面的分析，实际工程中减隔震装置因为安装间隙、制造工艺及算法本身的缺陷等原因，其提供给结构的真实有效的阻尼比往往达不到理论上的阻尼比，因而需要对理论的阻尼比进行折减，此折减系数选项，可以方便地对理论值进行折减。

参考文献：

- [1] 周锡元, 俞瑞芳. 非比例阻尼线性体系基于规范反应谱的 CCQC 法[J]. 工程力学, 2006, 23(2):9.
- [2] 胡卢成, 李志文, 马海涛. 隔震结构分析的等效迭代 CCQC 反应谱方法[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(35):5.
- [3] 陈云, 陈晓. 基于附加阻尼比的规范法与能量比值法对比. 蓝科减震 (微信公众号), 2022-03-16.
- [4] 建筑隔震及消能减震技术规程(DG/TJ 08-2326-2020/J 15292-2020)[S],2020-08-13.