

“建筑抗震韧性评价”程序使用教程

本程序基于《建筑抗震韧性评价标准》(GB/T 19106-2019)韧性评价方法的框架和实现过程,包括3个主要步骤:弹塑性时程分析,蒙特卡洛模拟和构件损伤状态确定,适用于一般建筑的抗震韧性评价(目前适用于框架和框架剪力墙结构)。本教程结合“建筑抗震韧性评价”开发程序,对一栋简单的七层钢筋混凝土框架进行韧性评价,给出构件层次的损伤状态。需要说明的是本程序仍处于开发完善阶段。

下载地址: https://github.com/research-group-of-Xinzheng-Lu/resilient_evaluation.git

1. 程序框架和实现过程

根据《建筑抗震韧性评价标准》(GB/T 19106-2019),评价建筑的结构和非结构构件损伤状态主要可分为3大步骤:弹塑性时程分析、蒙特卡洛模拟和构件损伤状态确定,如图1所示。

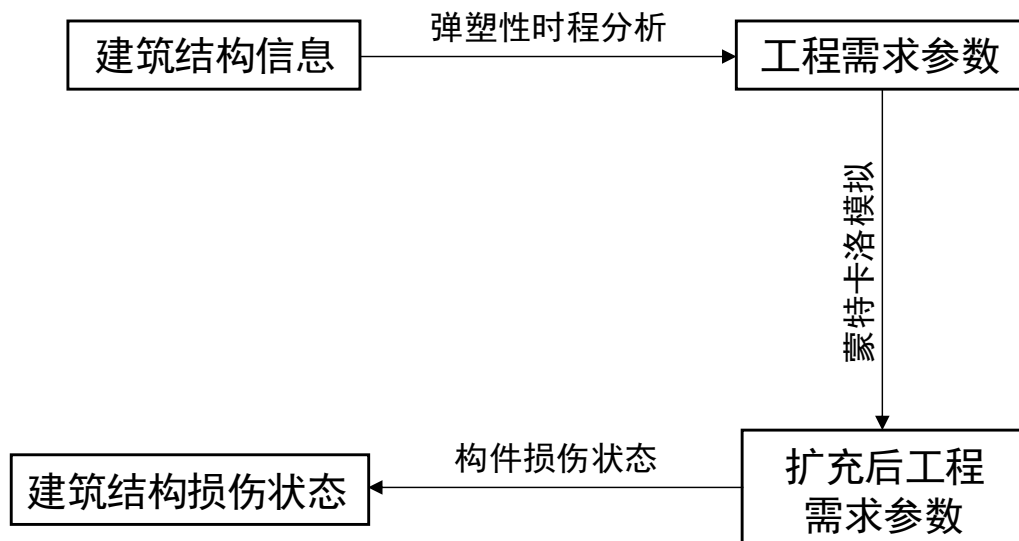


图1 建筑抗震韧性评价程序框架

首先根据建筑的结构构件信息,建立有限元模型,进行弹塑性时程分析。根据《建筑抗震韧性评价标准》(GB/T 19106-2019)的要求,选取11组地震动3向输入,3个方向地震动的PGA分别按1:0.85:0.65的比例调整。弹塑性分析时的材料强度均取标准值。

从弹塑性时程分析结果中提取用于判断构件损伤状态的**构件相对转角**以及用于判断非结构构件损伤状态的楼层响应(**楼层绝对加速度**和**楼层位移角**)作为

工程需求参数（EDP）。

采用统计学方法蒙特卡洛模拟，根据一定规律生成随机数。具体做法是，首先采用至少 11 条地震动进行结构弹塑性时程分析，获得各个构件的 EDP。然后，将 EDP 组装为一个 $m \times n$ 的 EDP 矩阵。 m 为弹塑性时程分析的地震动个数， n 为每次弹塑性分析结果的 EDP 数量。采用蒙特卡洛模拟方法根据以上的 EDP 矩阵的分布特性生成 l 个样本，并且重新组装为一个 $n \times l$ 矩阵，称之为扩充后的 EDP 矩阵。

通过扩充后的 EDP 矩阵和《建筑抗震韧性评价标准》（GB/T 19106-2019）给出的构件（结构构件和非结构构件）易损性信息来确定各个构件每个损伤状态的超越概率。计算出构件每个损伤状态的超越概率后，生成 0~1 的随机数，得到构件对应不同损伤状态的发生概率。

2. 程序介绍

本程序根据《建筑抗震韧性评价标准》（GB/T 19106-2019），基于 C++ 程序设计，适用于一般建筑的韧性评价。程序主要由 edps、properties、result、realization matrix 4 个文件夹和主执行程序 main.exe 组成。

2.1. edps 文件夹

该 edps 文件夹中存放从弹塑性时程分析中获取的工程需求参数文件，包括用于判断结构构件损伤状态的**构件相对转角**，以及用于判断非结构构件损伤状态的楼层响应（**楼层绝对加速度**和**楼层位移角**）。

edps 文件夹中应包含 beam_edp.txt, column_edp.txt, couplingbeam_edp.txt, wall_edp.txt, floor_acceleration_edp.txt, floor_drifratio_edp.txt，分别为梁、柱、连梁、墙、楼层加速度和层间位移角共 6 个 EDP 文件。

edps 文件夹中文件的行元素为不同构件的 EDP，列元素为一个构件在不同地震动作用下的 EDP，其中第一行保存了构件 EDP 的编号。例： l 条地震动作用下， m 个梁单元的工程需求矩阵如表 1 所示。

表 1 EDP 文件格式

1	2	...	m
δ_{11}	δ_{12}	...	δ_{1m}
δ_{21}	δ_{22}	...	δ_{2m}
...
δ_{l1}	δ_{l2}	...	δ_{lm}

2.2. properties 文件夹

properties 文件夹主要保存各个构件的信息。

properties 文件夹中应包含 beam_properties.txt, column_properties.txt, couplingbeam_properties.txt, wall_properties.txt, acc_nonstructure.txt, disp_nonstructure.txt, 分别为梁、柱、连梁、墙、加速度和位移敏感型非结构构件共 6 个属性文件。

对于框架柱的主要构件属性为单根构件体积, 截面高度, 构件屈服弯矩标准值, 轴压比以及截面刚度。其中, 第 1 列为构件编号, 如下表 2 所示:

表 2 柱构件属性文件格式

构件编号	构件体积	截面高度	屈服弯矩	轴压比	截面刚度
1	V_1	h_1	M_{p1}	μ_1	EI_{01}
2	V_2	h_2	M_{p2}	μ_2	EI_{02}
...
i	V_i	h_i	M_{pi}	μ_i	EI_{0i}

注: 上述构件截面刚度为对应各个转角方向的面内抗弯刚度。

对于梁单元, 需要提供更多的数据, 如: 构件体积、截面高度、梁端和跨中的屈服弯矩标准值, 和截面刚度。其中, 第 1 列为构件编号, 如表 3 所示:

表 3 梁构件属性文件格式

构件编号	构件体积	截面高度	左端屈服弯矩	跨中屈服弯矩	右端屈服弯矩	截面刚度
1	V_1	h_1	M_{pL1}	M_{pM1}	M_{pR1}	EI_{01}
2	V_2	h_2	M_{pL2}	M_{pM2}	M_{pR2}	EI_{02}
...
i	V_i	h_i	M_{pLi}	M_{pMi}	M_{pRi}	EI_{0i}

对于连梁和墙体单元，仅需给出单元体积即可，如表 4 所示：

表 4 连梁和剪力墙属性文件格式

构件编号	构件体积
1	V_1
2	V_2
...	...
i	V_i

对于非结构构件，需要提供构件易损性曲线的中位值和标准差，如表 5 所示：

表 5 非结构构件属性文件格式

构件 编号	DS1 中位值	DS2 中位值	DS3 中位值	DS1 标准差	DS2 标准差	DS3 标准差
1	θ_{11}	θ_{12}	θ_{13}	σ_{11}	σ_{12}	σ_{13}
2	θ_{21}	θ_{22}	θ_{23}	σ_{21}	σ_{22}	σ_{23}
i	θ_{i1}	θ_{i2}	θ_{i3}	σ_{i1}	σ_{i2}	σ_{i3}

2.3. 建筑抗震韧性评价主程序 main.exe

运行建筑抗震韧性评价主程序 main.exe 之前，需要完成 edps 文件夹和 properties 文件夹的数据准备，然后双击运行建筑抗震韧性评价程序 main.exe 文件，在弹出的控制窗口中，根据提示输入建筑楼层数和结构框架部分的抗震等级，随后主程序将调用每个子程序进行计算，最终给出构件不同损伤状态的发生概率。

2.4. 结果文件

Result 文件夹中有 error, floor damage, structural component damage, nonstructural component damage 分别为蒙特卡洛误差、楼层损伤状态、结构构件和非结构构件损伤状态文件夹。

floor damage 文件夹中的文件保存了每一层构件各个破坏状态的构件体积占同类构件总体积的比例。例： p 层结构 i 个破坏状态的概率 P 的结果文件格式如表 6 所示：

表 6 楼层构件损伤状态

楼层	破坏状态 1	破坏状态 2	...	破坏状态 i
1	P_{11}	P_{12}	...	P_{1i}
2	P_{21}	P_{22}	...	P_{2i}
...
p	P_{p1}	P_{p2}	...	P_{pi}

structural component damage 文件夹中的文件主要存储每个结构构件的损伤状态。例： m 个结构构件的 i 个破坏状态的概率 P 的结果文件格式如表 7 所示：

表 7 结构构件损伤状态

构件编号	破坏状态 1	破坏状态 2	...	破坏状态 i
1	P_{11}	P_{12}	...	P_{1i}
2	P_{21}	P_{22}	...	P_{2i}
...
m	P_{m1}	P_{m2}	...	P_{mi}

nonstructural component damage 文件夹中的文件主要存储每一种非结构结构构件的损伤状态。例： n 层， m 个非结构构件的 i 个破坏状态的概率 P 的结果文件格式如表 8 所示：

表 8 结构构件损伤状态

配构件编号：1				
楼层	破坏状态 1	破坏状态 2	...	破坏状态 i
1	$P_{11,1}$	$P_{12,1}$	...	$P_{1i,1}$
2	$P_{21,1}$	$P_{22,1}$	...	$P_{2i,1}$
...
n	$P_{n1,1}$	$P_{n2,1}$	...	$P_{ni,1}$
...
配构件编号： m				
楼层	破坏状态 1	破坏状态 2	...	破坏状态 i
1	$P_{11,m}$	$P_{12,m}$	...	$P_{1i,m}$
...
n	$P_{n1,m}$	$P_{n2,m}$	...	$P_{ni,m}$

注：过程文件生成的扩充 EDP 矩阵和蒙特卡洛模拟的误差请详见附录 A。

3. 七层钢筋混凝土框架韧性评价 step by step

3.1. 计算算例信息：

以一栋简单的七层钢筋混凝土框架作为韧性评价的基本案例。结构底层高 4.2m, 其余层高 3.6m, 总高 25.8m, 开间大小 5.4m×5.4m, 平面尺寸为 16.2m×10.8m。具体模型设计信息见附件“韧性评价算例-模型-PKPM”。

结构 X 方向为 3 个开间，Y 方向为 2 个开间，平面布置如图 2 所示。

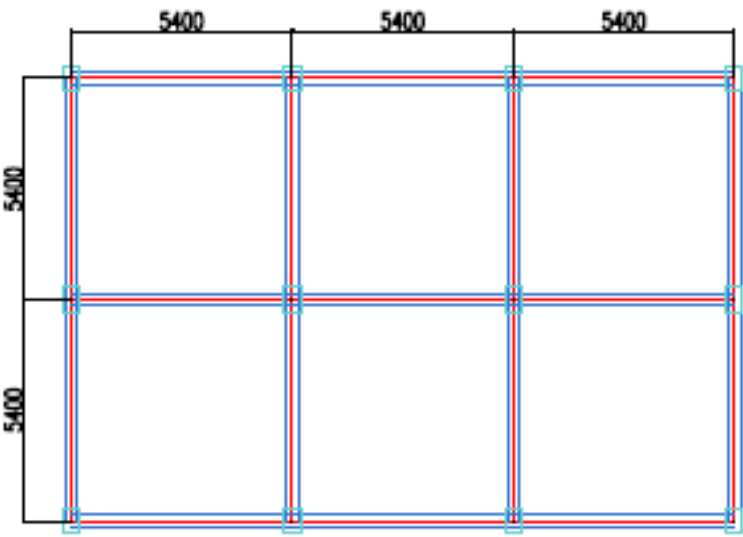


图 2 标准层平面布置图

该框架抗震设计以及场地条件如表 9 所示。

表 9 抗震设计及场地条件	
项次	取值
设防烈度	7.5 度
场地类别	二类
框架抗震等级	二级
抗震分组	第三组

该框架结构布置三维简图如图 3 所示

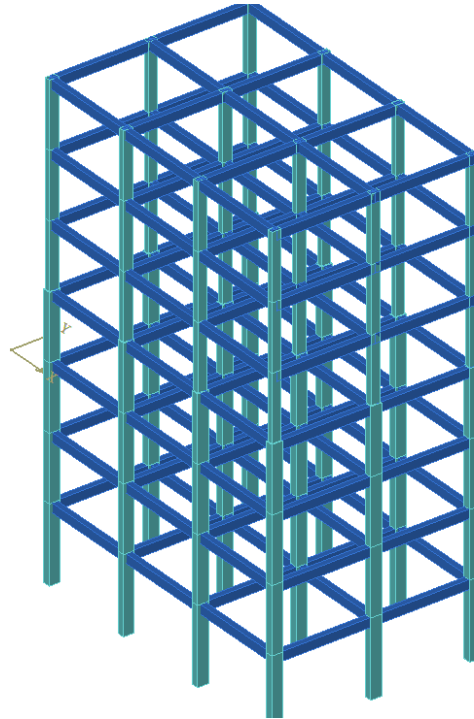


图 3 结构布置三维简图

设计荷载、构件基本尺寸和材料、有限元建模与检验、结构大震弹塑性分析的具体信息见文件“框架算例.pdf”，其中结构大震弹塑性分析的选波见文件 eq.xlsx。

3.2. properties 文件夹的数据文件准备

根据 PKPM 的设计结果，可以得到模型的配筋信息，根据配筋信息按照规范能够计算出结构构件的屈服弯矩标准值，得到韧性评价所需的 properties 文件夹数据文件（包括梁、柱、墙等构件的体积，梁柱构件屈服弯矩标准值，截面高度，弹性模量和惯性矩等信息）。计算过程见附件“Mp 计算.xlsx”文件，计算结果整理见 properties 文件夹下的 txt 格式文件。

3.3. edps 文件夹的数据文件准备

根据 Marc 有限元计算结果，能够得到结构构件在罕遇地震下的响应，汇总得到韧性评价所需要的 edps 文件夹数据文件（包括楼层的加速度响应，层间位

移角以及梁、柱、墙等构件的转角等信息)。计算结果整理见 edps 文件夹下的 txt 格式文件。

3.4. 运行建筑抗震韧性评价主程序 Main.exe

在完成 edps 文件夹和 properties 文件夹的数据准备后，双击建筑抗震韧性评价主程序 Main.exe，弹出图 4 控制窗口，仅需根据提示输入建筑楼层数和结构框架部分的抗震等级即可，前提为每个楼层的构件数量一致。随后主程序将调用每个子程序进行计算，最终给出构件层次不同损伤状态的发生概率，完成计算。

```
请输入建筑的楼层数: 7
请输入框架抗震等级: 2
请输入蒙特卡洛模拟次数: 2000
请输入结构类别:
1为框架结构; 2为框架-剪力墙结构: 1
请输入单根柱的EDP个数: 1
请输入单根梁的EDP个数: 3
=====蒙特卡洛模拟=====
=====框架柱EDP矩阵=====
Maximum Value of Mean error: 0.247364%
Average Value of Mean error: 0.112014%
Maximum Value of Covariance error: 10.982%
Average Value of Covariance error: 2.55751%
=====框架梁EDP矩阵=====
Maximum Value of Mean error: 0.245088%
Average Value of Mean error: 0.118292%
Maximum Value of Covariance error: 14155.7%
Average Value of Covariance error: 5.8717%
=====楼层位移角EDP矩阵=====
Maximum Value of Mean error: 0.274755%
Average Value of Mean error: 0.20288%
Maximum Value of Covariance error: 2.79638%
Average Value of Covariance error: 1.46244%
=====楼层加速度EDP矩阵=====
Maximum Value of Mean error: 0.2546%
Average Value of Mean error: 0.136813%
Maximum Value of Covariance error: 41.5943%
Average Value of Covariance error: 6.33445%
=====构件损伤破坏确定=====
框架柱构件损伤状态确定完毕
框架梁构件损伤状态确定完毕
加速度敏感非结构构件损伤状态确定完毕
位移敏感非结构构件损伤状态确定完毕
韧性评价完成!!!
按任意键退出..._
```

图 4 7 层钢筋混凝土框架抗震韧性评价主程序 main.exe 输入

- (1) 本钢筋混凝土框架为 7 层，框架的抗震等级为 2 级
 - (2) 蒙特卡洛模拟次数不应小于 1000 次，建议的取值应尽量满足 Average value of Covariance error 小于 10%
 - (3) 单根柱的 EDP 个数和单根梁的 EDP 个数
- 在确定每根梁柱构件的损伤状态时，所需的相对转角 EDP 个数。

注意：

梁柱构件因截面配筋变化和弯矩变化，可能存在多个控制截面，程序可对每个控制截面的 EDP 进行分析，并取每个构件所有截面最大损伤状态为构件损伤状态。

3.4、计算结果整理

3. 4. 1. 计算输出结果文件

realization_matrix 文件夹

生成梁、柱、连梁、墙体、楼层加速度、层间位移角、非结构构件的扩充后工程需求参数矩阵txt格式文件,分别见:beam_realization_matrix.txt、column_realization_matrix.txt 、 couplingbeam_realization_matrix.txt 、 wall_realization_matrix.txt 、 floor_acceleration_realization_matrix.txt、 floor_driftratio_realization_matrix.txt

result 文件夹

Result 文件夹中有 error, floor damage, structural component damage, nonstructural component damage 分别为蒙特卡洛误差、楼层损伤状态、结构构件和非结构构件损伤状态文件夹。

3. 4. 2. 计算输出结果文件整理

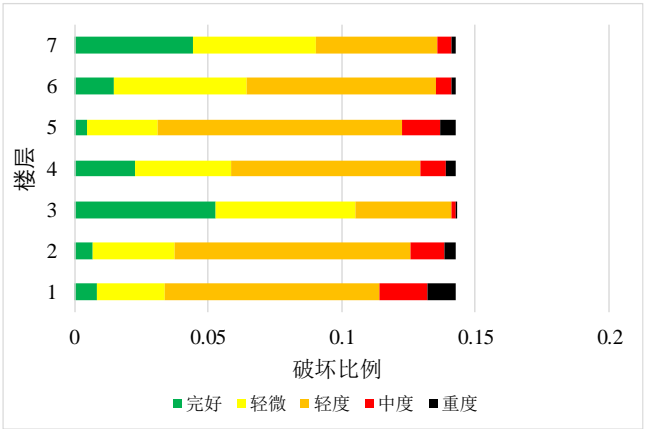


图 5 结构梁损伤情况

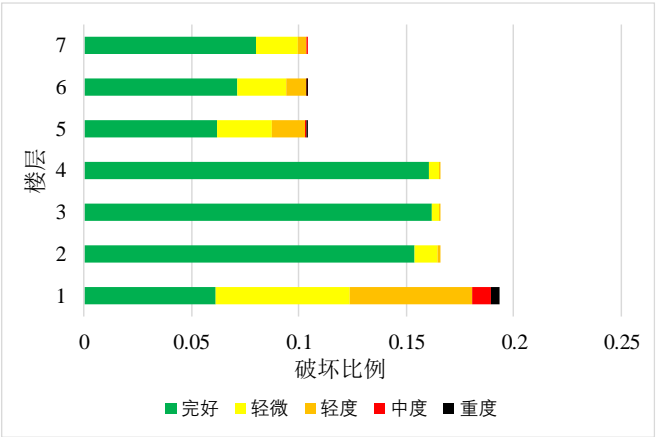


图 6 结构柱损伤情况

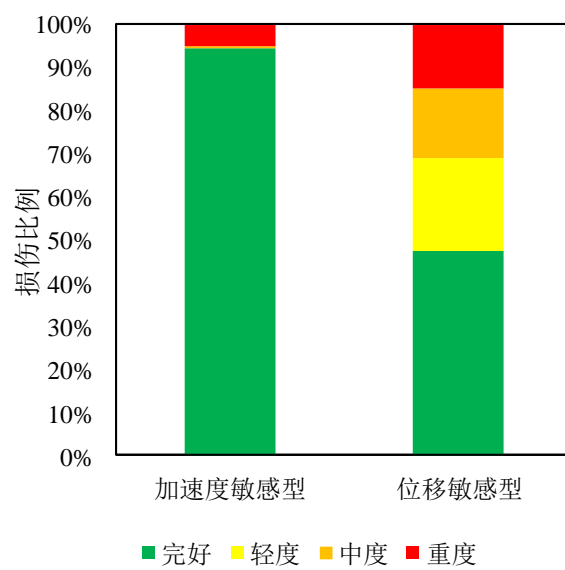


图 7 结构非结构构件损伤情况统计

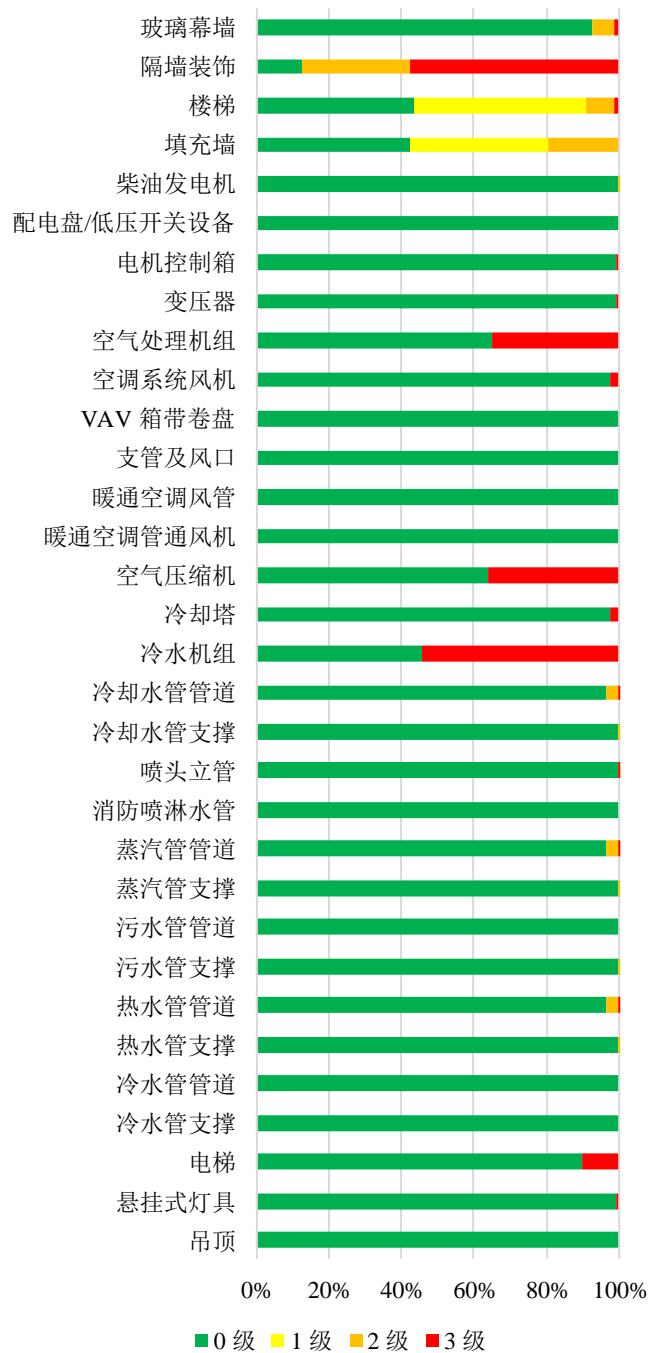


图 8 结构非结构构件损伤具体情况

附录 A：过程文件

程序将调用生成工程需求扩充矩阵模块对 edps 文件夹中的 EDP 参数进行扩充并保存到 realization_matrix 文件夹中。扩充 EDP 矩阵为通过 x 次蒙特卡洛模拟得出的 EDP 矩阵。例：1 个梁构件有 n 个构件单元的 EDP 矩阵如表 A1 所示：

表 A1 EDP 扩充矩阵

第 1 次蒙特卡洛	第 2 次蒙特卡洛	...	第 x 次蒙特卡洛
δ_{11}	δ_{12}	...	δ_{1x}
δ_{21}	δ_{22}	...	δ_{2x}
...
δ_{n1}	δ_{n2}	...	δ_{nx}

生成扩充矩阵后需要对比扩充前和扩充后的 EDP 对数矩阵的均值向量 M_Y 和协方差矩阵 Σ_{YY} ，检查扩充后样本分布是否保持原有样本的分布特性。error 文件夹中的误差文件主要分为中位值误差和协方差两种文件。其误差值为扩充后样本分布与原有样本分布均值或协方差的比值一般为 1 左右。如表 A2、A3 所示：

表 A2 中位值误差数组

1	2	...	m
ε_1	ε_2	...	ε_m

表 A3 协方差误差矩阵

	1	2	...	m
1	ε_{11}	ε_{12}	...	ε_{1m}
2	ε_{21}	ε_{22}	...	ε_{2m}
...
m	ε_{m1}	ε_{m2}	...	ε_{mm}

在计算过程窗口将在每个蒙特卡洛模拟结束后显示 Average value of Mean error 和 Average value of Covariance error，其计算方法公式 1、2 所示：

$$\sum_{i=1}^m \frac{(\varepsilon_i - 1)}{m} \quad 1$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \frac{(\varepsilon_{ij} - 1)}{m^2} \quad 2$$