

# PDEM 分析系统 V3.0——使用说明


(2018-01-16, 同济大学工程可靠性与随机力学国际联合研究中心)

## 目录

1 安装与启动 .....	2
2 输入与操作 .....	3
2.1 选点模块与确定性分析结果数据格式 .....	3
2.1.1 选点模块 .....	4
2.1.2 确定性分析结果数据格式 .....	6
2.2 PDEM 求解与结果可视化.....	6
2.2.1 PDEM 输入与说明 .....	6
2.2.2 结果可视化演示 .....	10
3 关于软件的其他说明 .....	14

# 1 安装与启动

PDEM 分析系统 V3.0 基于 Windows 操作系统开发而成, 用户应确保所使用的操作系统版本为 Windows XP 以上(对于 XP 系统的用户, 在使用过程中若遇到动态链接库缺失的问题, 请与我们联系 [chenjb@tongji.edu.cn](mailto:chenjb@tongji.edu.cn))。

PDEM 分析系统 V3.0 不需要安装即可使用, 在下载和解压我们提供的 [PDEM Analysis System V3.0.zip](#) 压缩包后, 双击打开  PDEM.exe 执行文件, 即可启动 PDEM 分析系统 V3.0, 如图 1.1 所示。(友情提醒: 建议用户不对压缩后的文件做删除或修改, 若需将本分析系统添加到桌面快捷方式或开始屏幕, 右键 PDEM.exe 进行相应的操作即可。)

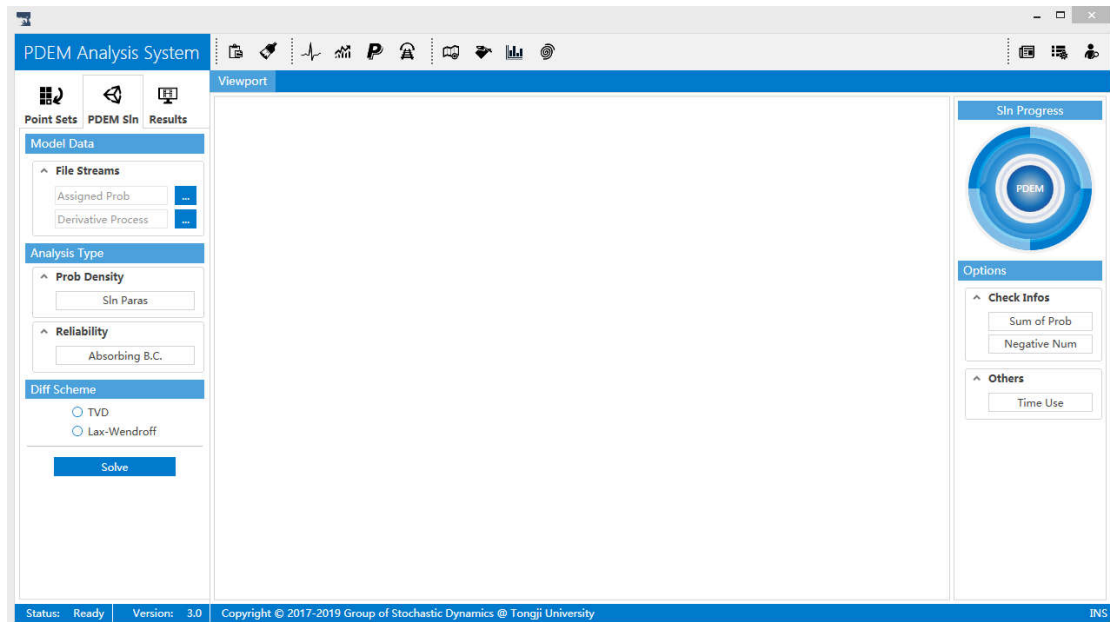


图 1.1 PDEM 分析系统 V3.0 启动界面

如图 1.1 左侧菜单栏所示, PDEM 分析系统 V3.0 主要包含三个模块, 分别为概率选点模块(Point Sets)、广义概率密度演化方程求解模块(PDEM Sln)和结果可视化模块(Results)。其中:

- Point Sets 模块的功能为根据待求解随机问题的基本随机向量维数进行选点处理, 输出用于确定性分析的点集赋得概率和相应维数的代表点值;
- PDEM Sln 模块根据用户的确定性分析结果、求解广义概率密度演化方程, 从而得到均值、标准差、概率密度和可靠度等结果;
- 结果显示于 Results 可视化模块中。

下面将通过具体算例演示 PDEM 分析系统 V3.0 的输入与操作过程。

## 2 输入与操作

### 2.1 选点模块与确定性分析结果数据格式

本节为 PDEM 求解的数据准备阶段，包括概率选点和确定性分析结果数据两部分，其中概率选点的输出用于确定性分析，用户根据确定性分析的结果准备 PDEM 求解的输入数据文件。需要特别说明的两点是：

- **关于选点：**若用户已经自己生成了随机变量空间的离散代表点集及其赋得概率，可略过选点模块。对于 PDEM 的求解，优先建议采用基于 GF 偏差最小化的点集。当前，对于基本点集为正态分布的情况，程序中提供了基于 GF 偏差最小化生成的旋转拟对称点集的坐标和赋得概率（理论基础可以参考：“Chen JB, Zhang SH. Improving point selection in cubature by a new discrepancy. SIAM Journal on Scientific Computing, 2013, 35(5): A2121-A2149”）。对于一般概率分布依据 GF 偏差最小化生成最优离散代表点集的程序尚在完善之中，将于更新版本中发布，基本理论基础与实施步骤可以参考：“陈建兵，张圣涵. 非均布随机参数结构非线性响应的概率密度演化. 力学学报, 2014, 46(1): 136-144”和“Chen JB, Yang JY, Li J. A GF-discrepancy for point selection in stochastic seismic response analysis of structures with uncertain parameters. Structural Safety, 2016, March, 59: 20-31”。
- **关于确定性分析：**本分析系统暂不提供诸如有限元、边界元和无网格法等工程结构数值分析求解器，需要用户采用商业有限元等软件或自编求解器进行结构分析，然后将所关注的物理量按所要求的数据格式以文本形式(.txt)进行准备完毕(详见 2.1.2 节)，方可进行 PDEM 求解。其中物理量应为“速度”，计算出来的结果为“位移”的概率信息，这里的“位移”和“速度”应作广义的理解，即“位移”可为任意物理量，而“速度”则为相应的“一阶时间导数过程”。

### 2.1.1 选点模块

切换本分析系统的左侧菜单至 Point Sets 模块，如图 2.1 所示。目前版本暂提供正态分布的选点且维数限制于  $n \in [3, 24]$ ，近期将推出更多随机分布的选点功能，需要注意的是每一维为均值为 0、标准差为 1 的标准正态分布，对于非标准正态分布用户稍作简单变换即可。

选点模块的具体操作为，在图 2.1 的文本对话框 N\_Dim 输入需要的维数，例如 9，点击按钮 Select 即可获得选点数据(如图 2.2 所示)。选点数据的输出则分别点击菜单块 Save Files 下的两个保存按钮分别输出代表点集赋得概率和相应维数的点集坐标值，其具体数据格式如图 2.3 所示，需要注意的是维度的坐标数据值文件在保存对话框时应选择文件夹。

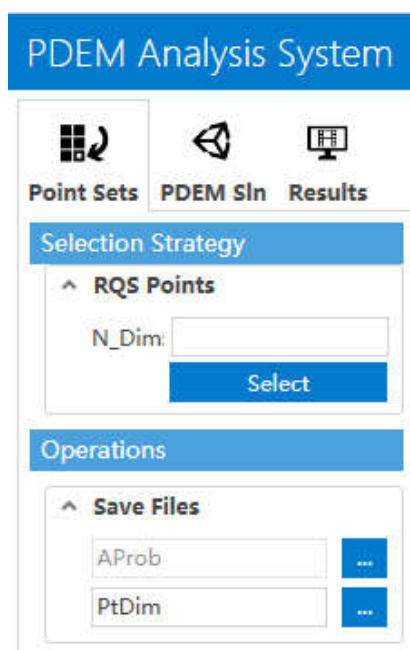


图 2.1 选点模块

AProb	PtDim1	PtDim2	PtDim3	PtDim4	PtDim5	PtDim6
0.0330579000	0.1361420000	-0.2685390000	-0.1589880000	1.0005700000	0.2439300000	-1.564460
0.0330579000	0.1540400000	-0.0996069000	-0.0293058000	0.1613800000	-0.0716864000	-0.277705
0.0330579000	-1.3502200000	0.5386500000	-0.0844697000	0.4478970000	1.2331100000	-0.407740
0.0330579000	0.7828650000	0.9301120000	-0.5496290000	1.4269700000	0.4723280000	0.518331
0.0330579000	-0.7065680000	0.6833280000	-0.9796690000	-1.0149800000	0.6810360000	0.234693
0.0330579000	0.3192100000	-1.5607800000	-0.9263410000	0.2586890000	0.9547760000	0.908244
0.0330579000	1.2579500000	0.3871840000	1.0392600000	-0.7386500000	1.4258100000	-0.172343
0.0330579000	0.4336100000	1.0965400000	-0.4970880000	0.1502340000	-0.5100020000	0.646280
0.0330579000	0.8063350000	0.0862582000	-1.4211300000	-0.7554310000	-0.1525420000	-1.101380
0.0330579000	-0.1361420000	0.2685390000	0.1589880000	-1.0005700000	-0.2439300000	1.564460
0.0330579000	-0.1540400000	0.0996069000	0.0293058000	-0.1613800000	0.0716864000	0.277705
0.0330579000	1.3502200000	-0.5386500000	0.0844697000	-0.4478970000	-1.2331100000	0.407740
0.0330579000	-0.7828650000	-0.9301120000	0.5496290000	-1.4269700000	-0.4723280000	-0.518331
0.0330579000	0.7065680000	-0.6833280000	0.9796690000	1.0149800000	-0.6810360000	-0.234693
0.0330579000	-0.3192100000	1.5607800000	0.9263410000	-0.2586890000	-0.9547760000	-0.908244
0.0330579000	-1.2579500000	-0.3871840000	-1.0392600000	0.7386500000	-1.4258100000	0.172343
0.0330579000	-0.4336100000	-1.0965400000	0.4970880000	-0.1502340000	0.5100020000	-0.646280
0.0330579000	-0.8063350000	-0.0862582000	1.4211300000	0.7554310000	0.1525420000	1.101380
0.0031637400	-0.9799750000	-0.9584760000	1.9282200000	-0.5006800000	-2.2860200000	0.650026
0.0031637400	-2.1132000000	-0.7762000000	1.6366200000	1.2203200000	-0.7836380000	-1.755230
0.0031637400	0.0024852200	-0.2512250000	1.1706700000	2.0944700000	-1.5203100000	-0.468339

图 2.2 正态分布（基本随机向量为 9 维）的选点数据显示

pnt\_Prob.txt

1	146
2	0.0330579000
3	0.0330579000
4	0.0330579000
5	0.0330579000
6	0.0330579000
7	0.0330579000
8	0.0330579000
9	0.0330579000
10	0.0330579000
11	0.0330579000
12	0.0330579000
13	0.0330579000
14	0.0330579000
15	0.0330579000
16	0.0330579000
17	0.0330579000
18	0.0330579000
19	0.0330579000
20	0.0031637400
21	0.0031637400
22	0.0031637400
23	0.0031637400
24	0.0031637400
25	0.0031637400
26	0.0031637400
27	0.0031637400
28	0.0031637400
29	0.0031637400
30	0.0031637400
31	0.0031637400
32	0.0031637400
33	0.0031637400
34	0.0031637400
35	0.0031637400
36	0.0031637400
37	0.0031637400

PtDim1.txt

1	0.1361420000
2	0.1540400000
3	-1.3502200000
4	0.7828650000
5	-0.7065680000
6	0.3192100000
7	1.2579500000
8	0.4336100000
9	0.8063350000
10	-0.1361420000
11	-0.1540400000
12	1.3502200000
13	-0.7828650000
14	0.7065680000
15	-0.3192100000
16	-1.2579500000
17	-0.4336100000
18	-0.8063350000
19	-0.9799750000
20	-2.1132000000
21	0.0024852200
22	-1.4218300000
23	-1.5706500000
24	-3.0332300000
25	-0.5881920000
26	-2.3418600000
27	-0.3285070000
28	-2.0821700000
29	0.3628680000
30	-1.0997100000
31	-1.2485400000
32	-2.6728500000
33	-0.5571610000
34	-1.6903900000
35	0.5103740000
36	-0.9139380000
37	1.2017500000

图 2.3 正态分布（基本随机向量为 9 维）的输出数据格式

## 2.1.2 确定性分析结果数据格式

用户根据选点策略或自行选点获得的点集进行结构的确定性分析后, 应将所关注的物理量(“速度”)输出并保存为文本格式(.txt), 其文件名**必须**以阿拉伯数字进行标记, 如 Demo 文件夹中的 W\*\*\*.txt 示例(共 192 个离散代表点, 因而有代表性时程, 每一个代表性时程长度为 1024, 时间间隔为 0.02), 其中 “\*\*\*” 为阿拉伯数字并与赋得概率文件 pnt\_Prob.txt 对应, 具体如图 2.4 所示。



图 2.4 确定性分析结果数据格式

## 2.2 PDEM 求解与结果可视化

数据准备完毕后, 即可进行 PDEM 求解。本节包括求解和可视化两部分, 下面说明本系统的操作过程。

### 2.2.1 PDEM 输入与说明

切换本分析系统的左侧菜单至 PDEM Sln 模块, 如图 2.5 所示。在这部分, 需要用户进行的工作包括:

- (1) 导入前面所准备的赋得概率和确定性分析结果文件;
- (2) 输入 PDEM 求解参数和可靠度阈值;

(3)选择差分格式和求解。

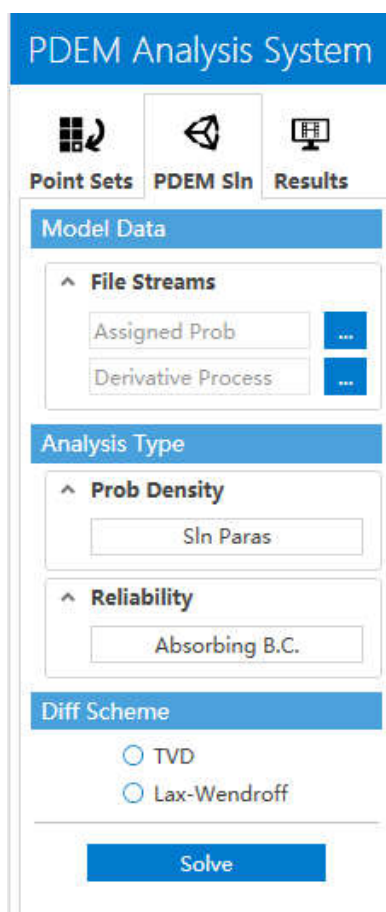


图 2.5 PDEM 求解模块

- (1)文件导入：在菜单块 Model Data 下的 File Streams 里，分别点击文件输入按钮（浅蓝色、内有“...”的方框），选择赋得概率文件和确定性分析结果文件(Shift 键可多选)，系统弹出图 2.6 的消息框则说明导入成功（这一例子是成功读取 Demo 文件夹中提供的数据之后显示的结果）。

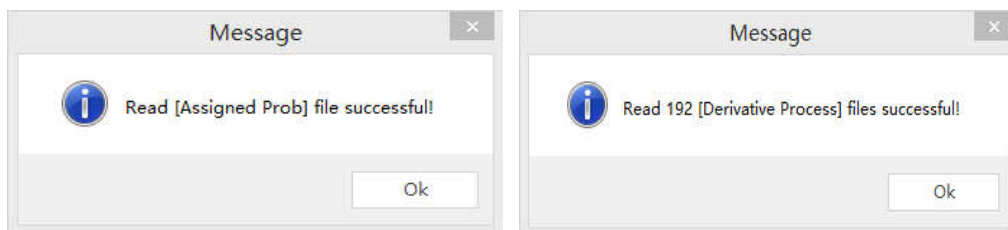


图 2.6 文件导入成功提示框

- (2)PDEM 求解参数和可靠度阈值输入：在菜单块 Analysis Type 下点击 Sln Paras 按钮弹出图 2.7 所示的对话框。其中：
- Num-Step of Smpls 和 Time-Step of Smpls 对应于用户在确定性分析时的

时程长度和时间间距(也就是确定分析数据对应的时程长度和时间步长);

- Ratio of Time-Sln 为 PDEM 差分求解步数与 2000 的比值。该值为正整数 ( $\geq 1$ ), 且通常  $\leq 10$ 。当采用 Lax-Wendroff 格式时, 无论该值输入为多少, 程序都将自动将其调整为 1; 当选择 TVD 格式时, 通常差分的时间步长宜不大于采用 Lax-Wendroff 格式的时间步长, 因此该值应  $\geq 1$ 。当该值取值为  $a$  时, TVD 差分格式的时间步长为以下将输入的参数 “Time-Step of Sln” 的  $1/a$ 。但输出结果的时间步长仍然为 “Time-Step of Sln”, 以免数据过大。同时, 为了避免数据过大, 结果输出步数固定为 2000;
- Time-Step of Sln 为 PDEM 差分求解的名义步长(该步长不应大于确定性分析的步长 Time-Step of Smpls); 如上一步说明指出, 实际求解步长为 Time-Step of Sln 除以 Ratio of Time-Sln;
- Mesh-Step of Adj 则为差分求解的网格比调整因子 (通常取 0.95 左右即可);
- Number of Bound 为概率密度函数求解时的网格计算范围截断大小(原因在于概率密度的尾部总是渐进趋于 0 的, 建议取 100 左右, 若计算结果获得的总概率密度小于 1, 则应适当增大该值);
- Spc-Step of Check 为概率检查步(用户可任意输入)。
- 以上这些输入完毕, 点击 Apply 按钮提交求解数据。
- 此外, 对于首次超越破坏动力可靠度计算, 点击 Absorbing B.C 按钮, 弹出对话框(图 2.8 所示), 用户可根据实际情况输入相应阈值后, 点击 Apply 按钮提交可靠度阈值数据。(关于采用 PDEM 进行基于吸收边界条件的首次超越破坏动力可靠度分析的理论基础, 请参考: “Li J, Chen JB. Stochastic Dynamics of Structures. John Wiley & Sons, 2009, Chapter 8.” 及 “Chen JB, Li J. Dynamic response and reliability analysis of nonlinear stochastic structures. Probabilistic Engineering Mechanics, 2005, 20(1): 33-44”。) 结构首次超越破坏动力可靠度也可以采用极值分布与等价极值事件原理进行, 目前尚未包括在该软件中, 将在今后更新版本中发布。关于极值分布与等价极值事件原理的理论基础, 可以参考: “Li J, Chen JB. Stochastic Dynamics of Structures. John Wiley & Sons,

2009, Chapter 8.”, “Chen JB, Li J. The extreme value distribution and dynamic reliability analysis of nonlinear structures with uncertain parameters. Structural Safety, 2007, 29(2): 77-93” 和 “Li J, Chen JB, Fan WL. The equivalent extreme-value event and evaluation of the structural system reliability. Structural Safety, 2007, 29(2): 112-131”。

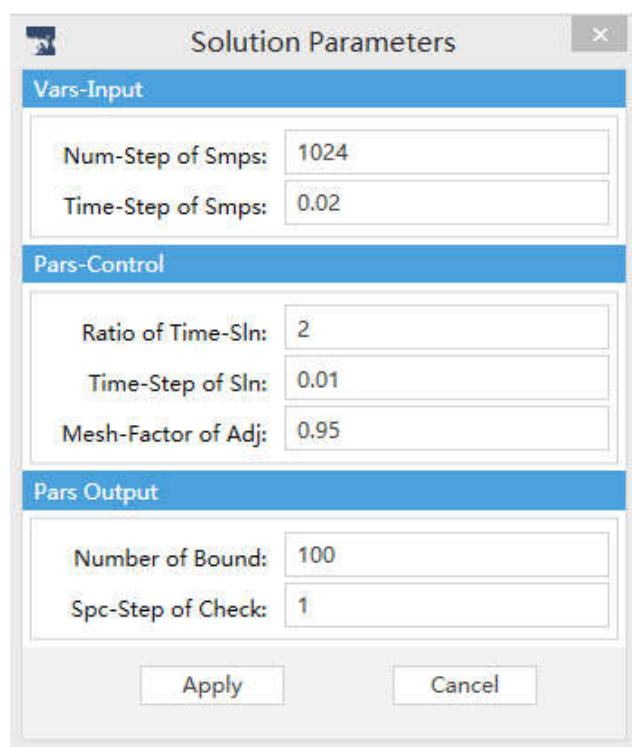


图 2.7 PDEM 求解参数输入对话框

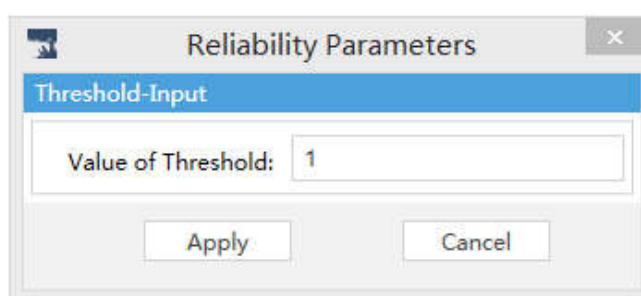


图 2.8 可靠度阈值输入对话框

- **(3)差分格式选择和求解：**在菜单块 Diff Scheme 下选择差分 TVD 或 Lax-Wendroff 后，点击 Solve 按钮提交求解。届时系统右侧的圆形进度条(图 2.9a)将开始滚动并弹出图所示的对话框(图 2.9b)，求解完毕后圆形进度条将停止滚动，此时用户可进入结果可视化模块。应注意：当需要进行结构可靠

度分析时，应选用 TVD 格式；当仅进行结构动力反应的概率密度演化分析时，可以采用 Lax-Wendroff 格式或 TVD 格式，且将 Absorbing B.C 输入值设置到很大。（关于 TVD 格式与 Lax-Wendroff 差分格式的具体表达及理论基础，请参考“Li J, Chen JB. Stochastic Dynamics of Structures. John Wiley & Sons, 2009, Chapter 8.”及“Li J, Chen JB. Dynamic response and reliability analysis of structures with uncertain parameters. International Journal of Numerical Methods in Engineering, 2005, 62: 289-315”。）



图 2.9 求解过程提示信息

### 2.2.2 结果可视化演示

切换本分析系统的左侧菜单至 **Results** 模块，如图 2.10 所示。这一部分提供了如下功能：

- (1) 均值和标准差等数字特征的可视化；
- (2) 概率密度曲线(可选多条任意时刻的概率密度曲线)和曲面的可视化；
- (3) 动力可靠度曲线可视化。

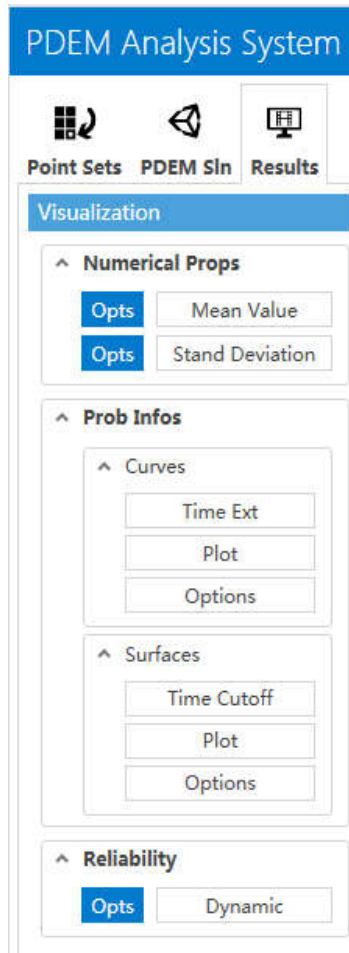


图 2.10 结果可视化模块

- (1)数字特征可视化: 在菜单块 Numerical Props 下, 点击 Mean Value 按钮即可显示均值结果, 点击 Stand Deviation 则显示标准差结果, 二者如图 2.11 和 2.12 所示, 用户若需修改标题和坐标则点击 Opts 按钮弹出对话框进行相应的修改即可。

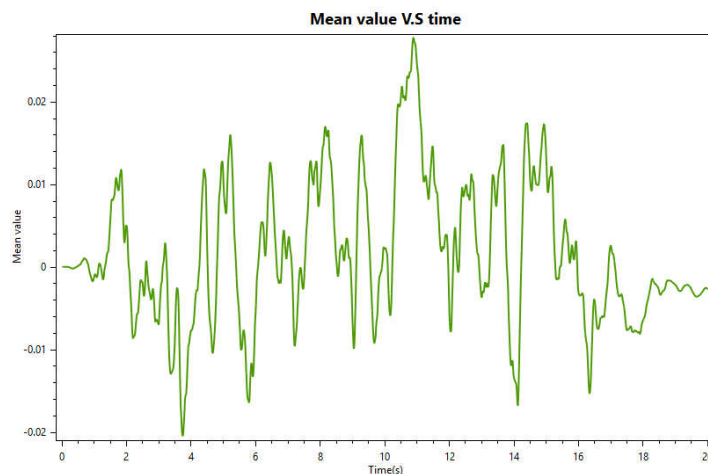


图 2.11 均值

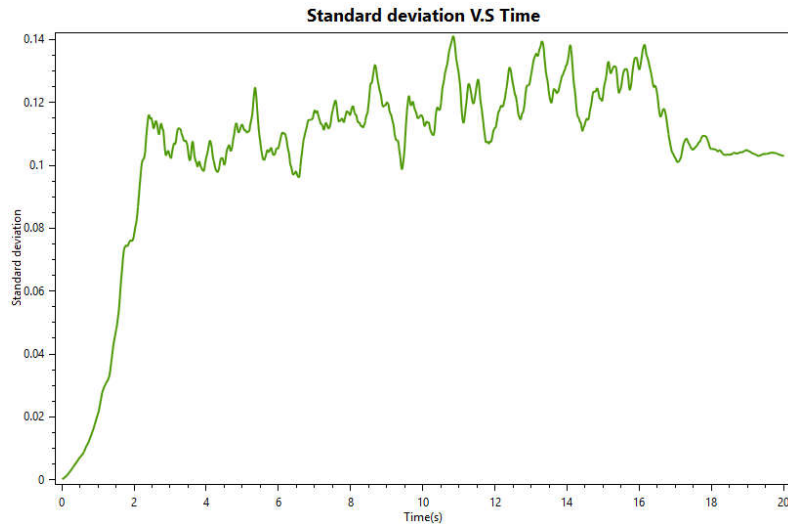


图 2.12 标准差

- (2)概率密度曲线和曲面的可视化: 在菜单块 Prob Infos 下 Curves 里点击 Time Ext 按钮弹出提取对话框, 输入若干时刻的概率密度曲线, 例如这里分别提取1,2,3,4s时刻, Apply 后点击 Plot 按钮即可绘制出选取时刻的概率密度曲线图(如图 2.13 所示)。在菜单块 Prob Infos 下 Surfaces 里点击 Time Cutoff 按钮弹出提取对话框, 输入截取时间段的始点和终点, 例如这里输入 10 和 11(表示截取10~11s时间段, 由于概率曲面数据庞大, 建议计算机配置一般的用户不应输入过大的时间间距), Apply 后点击Plot按钮即可绘制截取时段的概率密度演化曲面(如图 2.14 所示)。此外, 用户还可以点击工具条中的按钮



分别绘制不同形式的曲面表现形式分别如图 2.14(a-d)所示。此外, 用户若需修改标题和坐标则点击 Options 按钮弹出对话框进行相应的修改即可。

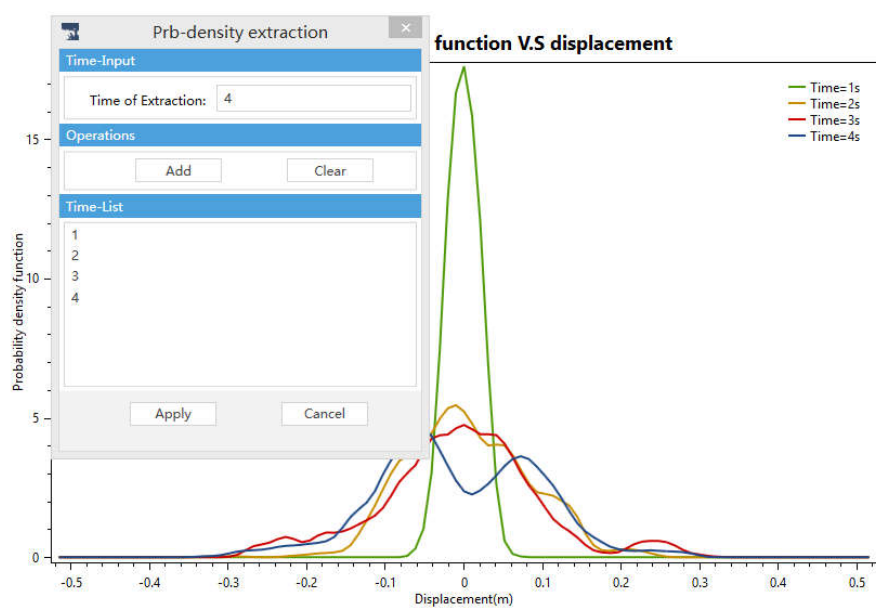


图 2.13 概率密度曲线的提取

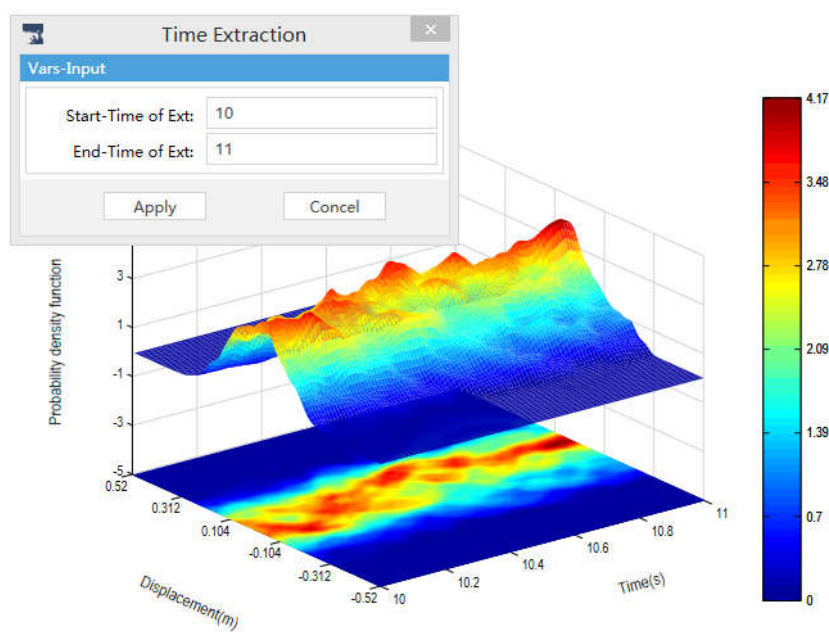
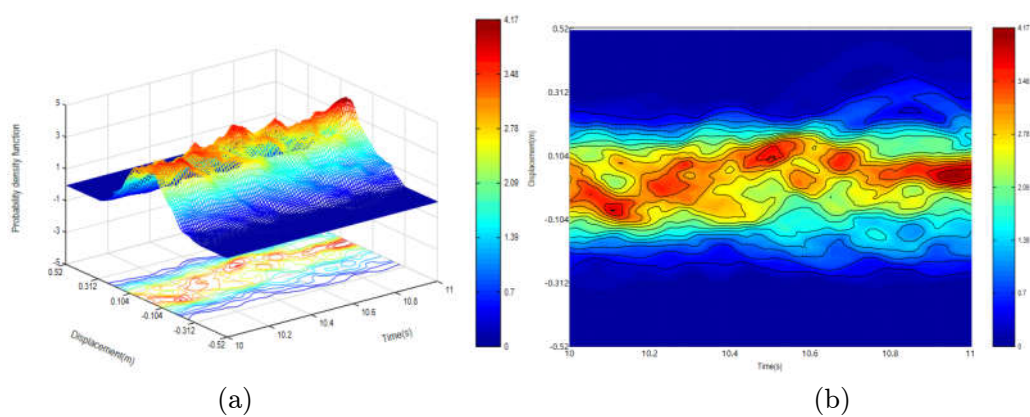


图 2.14 概率密度曲面的提取



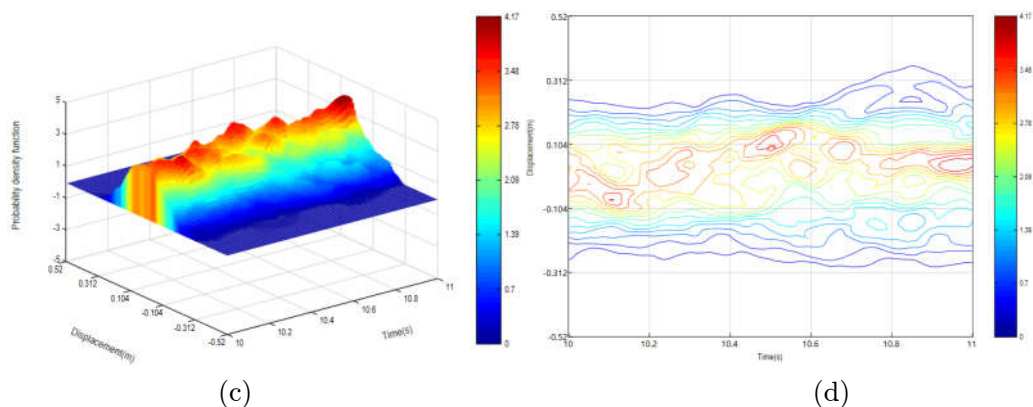


图 2.15 概率密度曲面的其它表现形式

- **(3)动力可靠度可视化:** 在菜单块 Reliability 下, 点击 Dynamic 按钮即可显示动力可靠度曲线图(如图 2.16 所示), 这里由于前面输入的可靠度阈值较大, 因此可靠度均为 1。

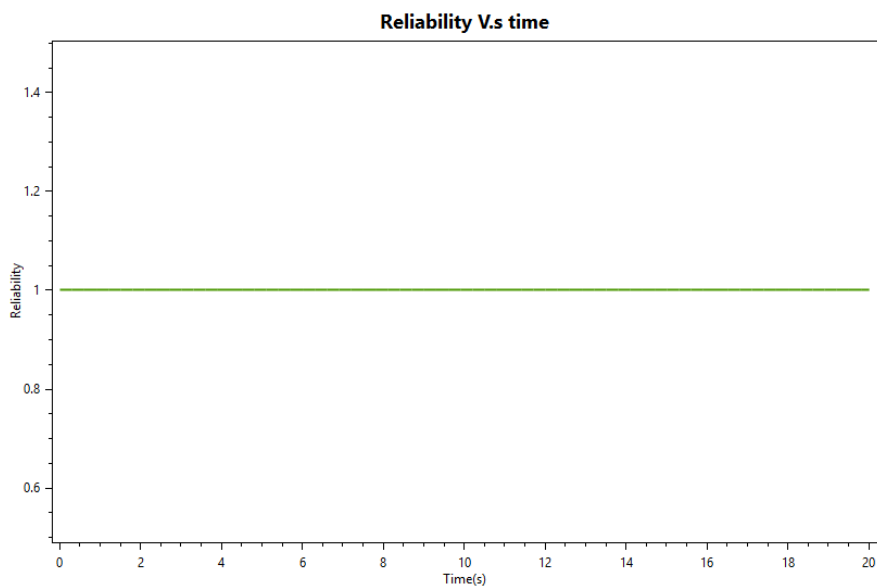


图 2.16 动力可靠度分析结果的可视化

### 3 关于软件的其他说明

- (1) 本软件版权归同济大学工程可靠性与随机力学国际联合研究中心所有。
- (2) 本软件不对采用本软件获得的分析结果负责。
- (3) 本软件联系人为陈建兵、编制人为卢广达。本软件首次发布时间为 2018 年 1 月。
- (4) 若有问题或建议, 欢迎随时反馈 (chenjb@tongji.edu.cn), 以利于进一步改进。