

# 软件说明书

## 一、设计说明

### 1.基本概念

#### 1.1 编写目的

近年来，中国高速铁路发展迅速。高速铁路主要采用“以桥代路”的方式修建，桥梁在线路中占比超过百分之五十，其中90%以上为简支梁桥，桥梁以刚度控制为设计准则来满足高速行车的平顺性要求。同时，中国作为地震高发国家，所规划的高铁路网大多穿越7度及以上高烈度地震区，高速铁路桥梁不可避免地面临严重地震威胁。作为生命线工程的桥梁，通过良好的设计使其在地震下不发生过大破坏，保持震后功能可恢复性对于保障生命和结构安全、尽快实现灾后救援具有重要意义。目前中国高速铁路抗震设计依据《铁路工程抗震规范》中给出了三水准抗震设防目标，但通过多遇地震设计结构弹性、罕遇地震验算桥墩延性的两阶段设计方法不能同时保证多个性能目标的实现，且在保持行车平顺性所要求的刚度控制设计原则下，桥梁结构的实际抗震性能不明确。为了进一步明确高速铁路桥梁结构的抗震性能以及避免桥梁支座在强地震下可能发生的破坏，在高速铁路桥梁中加入减隔震支座，提出了基于能量平衡的性能设计方法（EEDP），依据能量的传递和转化进行结构体系的性能设计，可保证结构实现依据规范且进一步明确的“多遇地震桥墩弹性、支座开始滑动，设计地震桥墩开始屈服，罕遇地震桥墩延性满足要求”的性能化设计目标。但是，目前并没有此类

的计算软件。

本软件以计算分析高速铁路简支梁桥的性能设计为目的，可以辅助结构设计人员合理设计和分析桥梁结构在不同地震强度下的性能特点，并对减隔震支座的设计提供指导。此软件具有算法简单、计算速度快、计算结果准确可靠等特点，适合设计人员和工程师在对高速铁路简支梁桥进行性能设计计算时采用。

#### 1.2 编写背景

##### 1.2.1 软件的名称：

软件名为《高速铁路减隔震桥梁性能设计的EEDP设计方法的计算分析软件》。

##### 1.2.2 开发者：

本软件由中南大学土木工程学院国巍、黄哲、杜乔丹共同自主开发。

##### 1.2.3 用户：

软件面向用户为高速铁路工程中的桥梁设计工程师及从事铁路结构抗震安全方向的科学研究人员。

### 1.2.4 运行软件的计算站:

软件需要在安装有有限元软件 OpenSees 和 MATLAB 数学软件的计算机上运行。

## 1.3 定义

**高速铁路桥梁:** 桥梁结构是高速铁路中常采用的结构形式, 其具有高平顺性、高稳定性和高可靠性等特点。

**减隔震支座:** 减隔震支座在行车下可通过锁定装置保障行车要求, 在强地震作用时锁定装置被动失效, 支座通过自身的耗能及延长桥梁结构周期来降低桥梁结构的地震响应以保障强地震下的结构安全。

**基于性能的抗震设计思想:** 即对于不同构筑物在各设防地震作用下应确立不同的设防目标的设计思想。

**性能目标:** 指结构在相应地震水准下允许达到的最严重的损坏状态。

**地震设防水准:** 即在工程设计中, 依据设计对象所在的客观环境及预期的设防目标, 同时将社会经济条件纳入考量, 选取作为防御的地震强度标准。

**单自由度体系:** 指可理想化为具有一个集中质量和一个无质量支撑结构的体系。

**地震反应谱:** 指单自由度弹性系统对于某个实际地震加速度的最大反应 (可以是加速度、速度和位移) 和体系的自振特征 (自振周期或频率和阻尼比) 之间的函数关系。

## 2. 总体设计

### 2.1 需求规定

系统的输入参数包括:

- 1) 地震动参数: 根据结构频率、阻尼比、设防等级、场地类别和分组选取的地震波时程;
- 2) 桥梁结构: 桥梁结构各个构件的几何尺寸和质量、桥墩屈服前后的刚度以及屈服时对应的力和位移。

系统的输出参数包括:

- 1) 摩擦摆隔震支座: 摩擦系数、滑动刚度;
- 2) 高速铁路简支梁桥单墩模型的第一振型;
- 3) 不同地震强度下桥梁结构的支座顶点位移, 桥墩顶点位移及桥墩底部剪力;
- 4) 能量平衡系数  $\gamma_a$  和  $\gamma_b$  的拟合公式及对应系数的取值;

软件计算要求所有参数统一采用国际单位制, 精确到小数点后两位, 数据类型为双精度字符和矩阵形式。在计算过程中, 可依据计算输出精度的需求调整计算变量, 从而提高程序运行的精确性与效率。

### 2.2 运行环境

软件的运行需要计算机安装有限元软件 OpenSees 和数学软件 MATLAB 的环境支持。

## 2.3 基本设计概念和处理流程

本软件利用有限元软件 OpenSees 和软件 MATLAB 实现了 EEDP 方法对高速铁路简支梁桥的减隔震设计。该软件实现了地震波向反应谱的转换，考虑了工程设计需要多种地震工况的原则，可实现多条地震波的输入。可以得到 EEDP 方法中涉及到的两个能量平衡系数的值，实现等效单自由度体系和双自由度体系的转换，得到双自由度体系的第一振型，进一步计算可得到摩擦摆支座的摩擦系数、滑动刚度。也可将设计结果和时程分析结果进行对比，整个计算过程形式简单，计算方便，适于工程应用，对工程师设计方案选取具有重要的指导意义。

软件计算模型主要包括四个模块，以及一个对比模块：

(1) 计算模块 1，为地震动反应谱的生成模块。如图 1 所示，其根据结构频率、阻尼比、设防等级、场地类别和分组，依托规范所给出的设计反应谱，给定与结构特征相关的反应谱具体取值。

(2) 计算模块 2，为 EEDP 方法中涉及到的两个能量平衡系数的计算模块，其计算模型是单自由度。如图 2 所示，首先在 OpenSees 中建立单自由度体系计算多条地震波激励下，不同初始周期、不同屈服比体系的顶点位移与对应的能量平衡系数，并输出结果。然后在 MATLAB 中对 OpenSees 输出结果进行匹配，拟合出不同初始周期、不同屈服比下能量系数对应的曲线，并输出对应的拟合曲线系数。

(3) 计算模块 3，为梁体-支座-桥墩双自由度模型的第一振型比的计算模块。如图 3 所示，首先通过 EEDP 方法计算得到单自由度体系的顶点位移，然后通过单自由度和双自由的转化关系，即可得到梁体-支座-桥墩双自由度模型的第一振型比。

(4) 计算模块 4，为支座滑动后刚度的计算模块。如图 4 所示，输入梁体的质量、桥墩的质量及刚度以及梁体-支座-桥墩双自由度模型的振型比，通过选定的刚度比，利用 MATLAB 的计算能力，多次循环，得出符合精度要求的支座滑动后刚度及周期。

(5) 对比模块，为 EEDP 计算值和时程分析值的对比模块。如图 5 所示，利用 EEDP 方法设计得到的设计值，在 OpenSees 中建立梁体-支座-桥墩物理模型，在多条地震波的激励下计算结构的动力响应，输出 EEDP 计算值和时程分析值的对比结果。

五个模块的具体处理流程可参考图 1、图 2、图 3，图 4 及图 5。

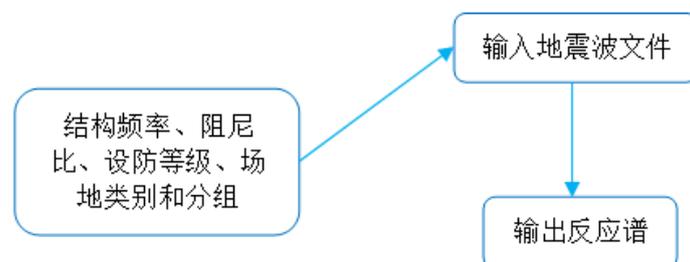


图 1 计算模块 1

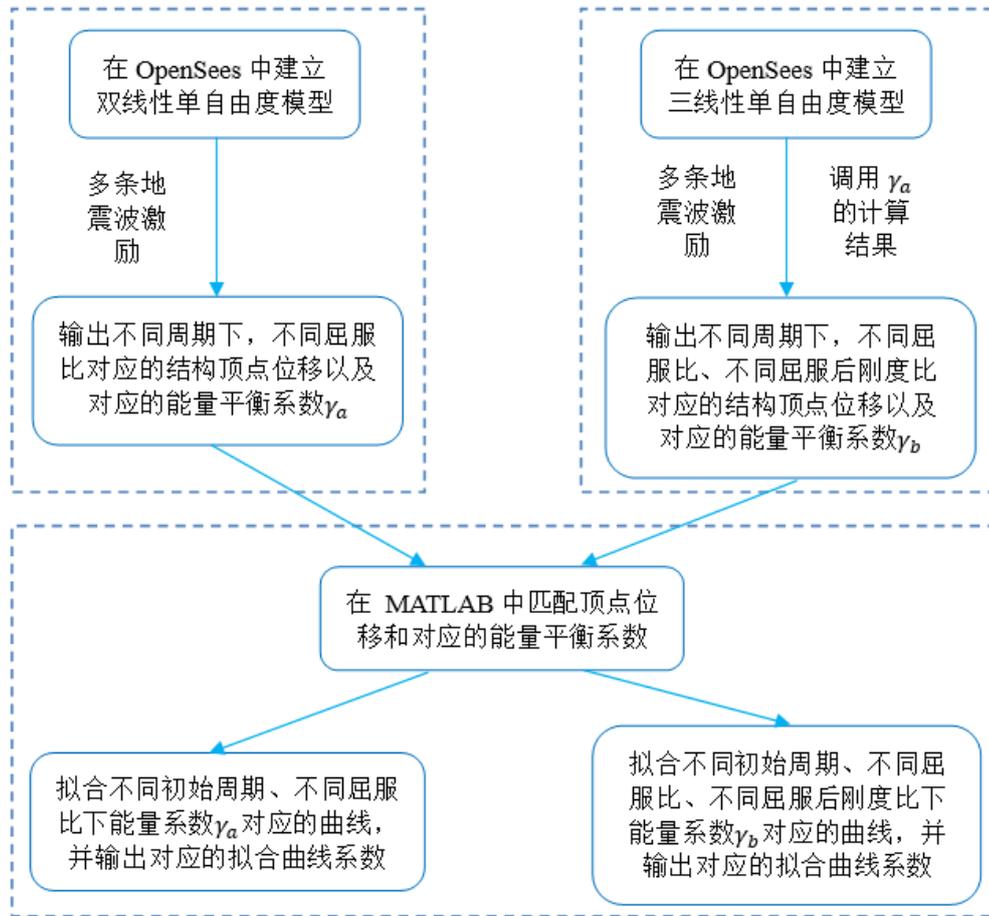


图 2 计算模块 2

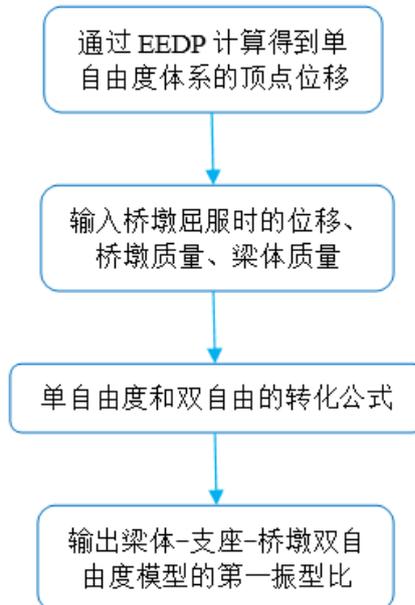


图 3 计算模块 3

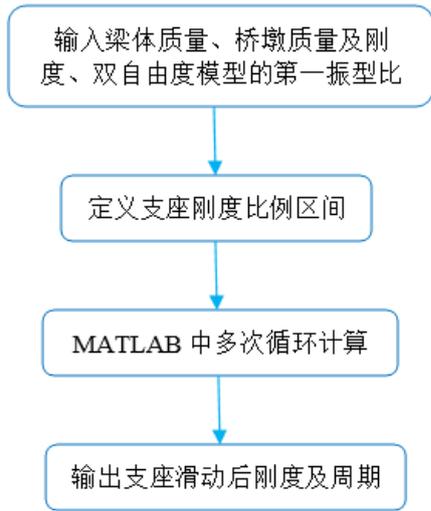


图 4 计算模块 4

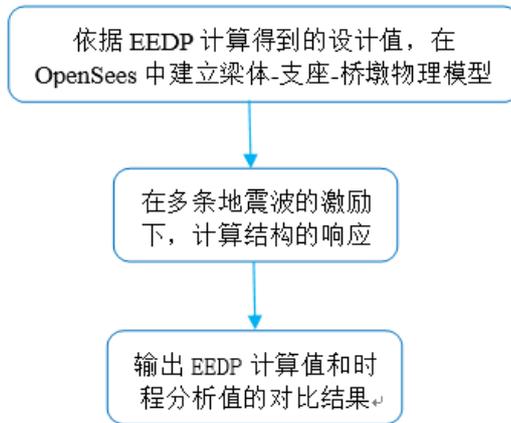


图 5 对比模块

## 2.4 结构

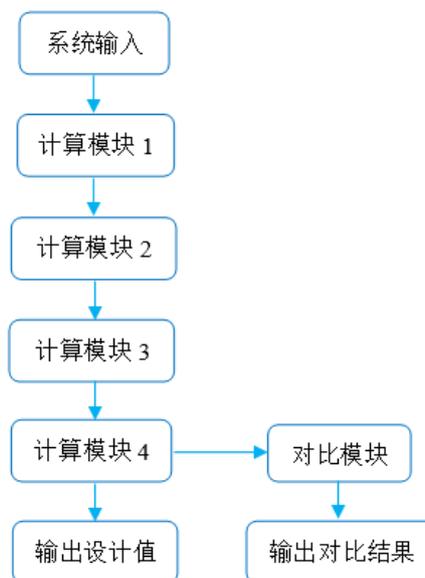


图 6 软件结构图

## 2.5 功能需求与程序之间的关系

功能需求	计算模块 1	计算模块 2	计算模块 3	计算模块 4	对比模块
反应谱生成	√				
能量平衡系数计算		√			
梁体-支座-桥墩双自由度模型的第一振型比计算			√		
支座滑动后刚度计算				√	
EEDP 计算值和时程分析值的对比分析					√

## 2.6 人工处理过程

软件运行前需要将需要输入或更改的参数值输入至程序代码的指定位置。

## 3.接口设计

### 3.1 用户接口

按照注释提示在主控制函数中输入参数，在程序中用“可改”字样标注。

### 3.2 外部接口

输出矩阵可导入 MATLAB 以及 Excel 等软件进行后期数据处理。

### 3.3 内部接口

软件内部各模块以.txt 文件、.out 文件或者.tcl 文件的方式调用，调用参数均为双精度字符。

## 4.运行设计

### 4.1 运行模块组合

用户根据研究对象选用不同的地震波，调用计算模块 1，生成地震反应谱。然后选择合适的屈服比区间、合适的屈服后刚度比，调用计算模块 2，计算不同周期下的能量平衡系数  $\gamma_a$  和  $\gamma_b$ 。利用得到的能量平衡系数和反应谱，通过简单计算得到计算模块 3 所需的参数，再通过调用计算模块 3，计算得到双自由度模型的振型，接着调用计算模型 4 可以得到支座的滑动后刚度，至此，结构设计完成。最后，调用对比模块，计算出设计值和时程分析值的对比结果。

## 4.2 运行控制

配置软件进行运算时，有限元软件 OpenSees 和数学软件 MATLAB 会根据计算情况不同会出现不同的提示，如果输入参数或者软件配置存在错误，两者都会给出错误的提示。如果参数正确无误且计算满足精度要求，则软件提示计算结束。

## 4.3 运行时间

运行时间与选用的地震波的条数，屈服比的区间有关。模块 1 计算一个周期的能量平衡系数，在 16 条地震波、屈服比区间里取 17 个值的情况下，计算需要 3 小时（运行时间取决于周期区间的长度、屈服比区间的长度、屈服后刚度区间的长度），其余模块计算时间都在 1 分钟以内。

## 5. 系统数据结构设计

### 5.1 逻辑结构设计要点

软件当中计算步定义为整数形式，其他参数均定义为双精度字符数，表示变化过程的参数均用矩阵形式存储。各个计算模块的耦合和调用都使用双精度字符数参数的格式进行。调用过程的中间参数存储为 TXT 文本文档格式。

### 5.2 物理结构设计要点

本系统的输出参数为 TXT 文本文档格式、MATLAB 数据文件（.mat 文件）。

### 5.3 数据结构与程序的关系

默认使用 MATLAB 打开后缀名为.mat 的文件，使用有限元软件 OpenSees 打开后缀名为.tcl 的文件，也可以使用有限元软件 OpenSees 和数学软件 MATLAB 调用 TXT 文本文档、使用 EXCEL 软件打开数据存储文件。

## 二、操作说明

### 1. 软件安装

调用 MATLAB 打开程序所在的 M 文件 module1.m、module2-c.m、module3.m、module4.m，同时调用 OpenSees 打开 TCL 文件 module2-a.tcl、module2-b.tcl 以及 module5.tcl，这些文件分别对应了四个计算模块和一个对比模块。module1.m 提供地震动输入反应谱值；module2-a.tcl、module2-b.tcl 和 module2-c.m 用于求解两个能量平衡系数；module3.m 用于计算梁体-支座-桥墩双自由度模型的第一振型比；module4.m 用于计算支座滑动后刚度；module5.tcl 用于分析 EEDP 计算值和时程分析值的对比结果。

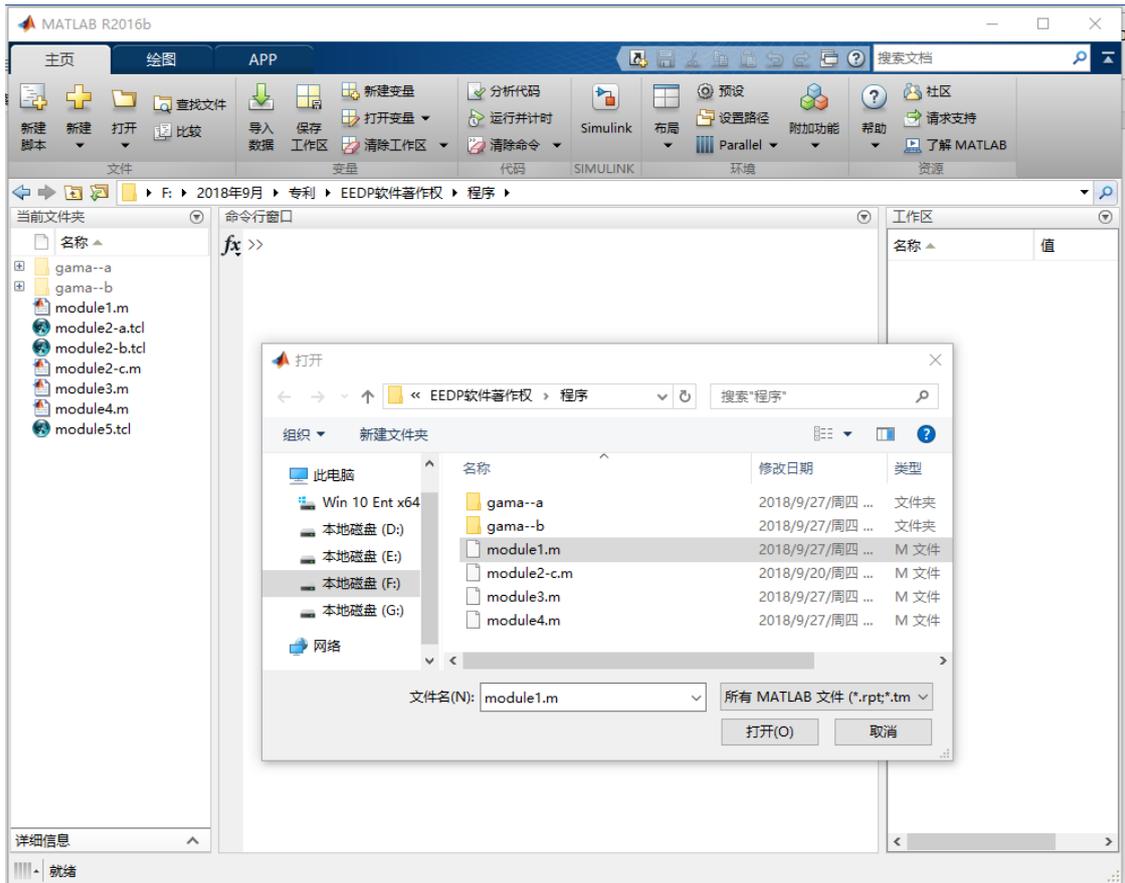


图 7 MATLAB 调用文件

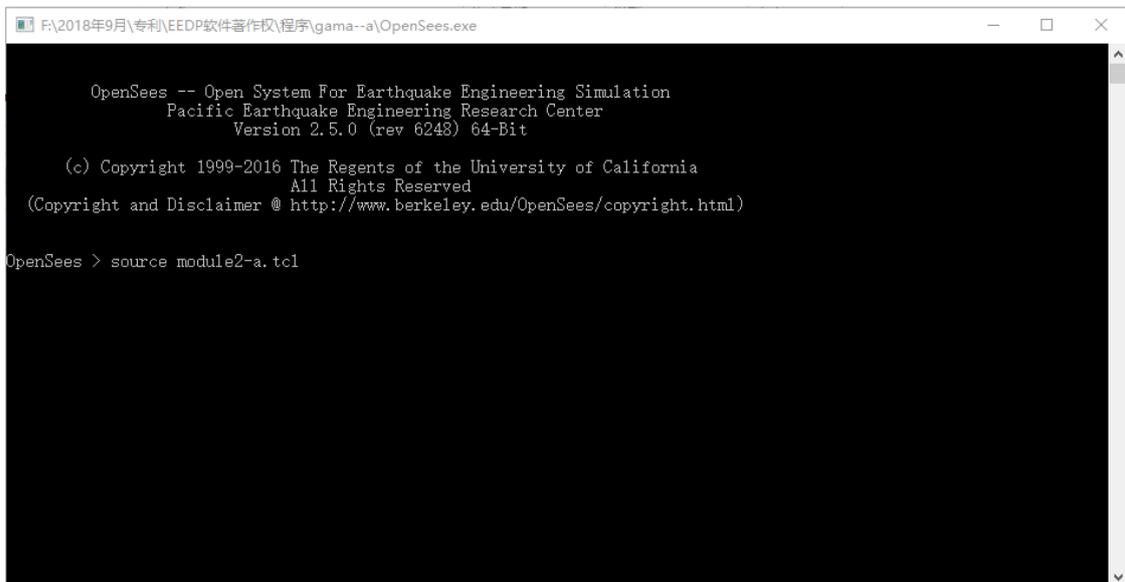


图 8 OpenSees 调用文件

## 2.操作简介

1) 在 module1.m 中输入结构自振频率、阻尼比、各条地震波的时间间隔、反应谱周期、地震波条数等参数，以及需要调用的地震波文件。

```

编辑器 - F:\2018年9月\专利\EEDP软件著作权\程序\module1.m
module1.m x +
1 -   clc;
2 -   clear;
3 -   %输入各条地震波时间间隔, detat.mat
4 -   load detat.mat;
5 -   %反应谱周期 (可改)
6 -   Tn=0.01:0.01:3.0;
7 -   kesi=0.05;
8 -   % n为地震波条数 (可改)
9 -   n=16;
10 -  %输出文件, MMDis、MMVel、MMAcc分比为位移、速度、加速度谱
11 -  MMDis=[];
12 -  MMVel=[];
13 -  MMAcc=[];
14 -  for k=1:n
15 -      x=[num2str(k) '.txt']; % '.txt' 为地震波文件名
16 -      text=importdata(x);
17 -      %A=text.data
18 -      A=text;
19 -      A=A';
20 -      Accelerate=A(:);
21 -      b = find(~isnan(Accelerate));
22 -      res = Accelerate(b);
23 -      Accelerate=res;
24 -      %地震波文件调幅
25 -      cc=max(abs(Accelerate));
26 -      c=2*cc/cc;
27 -      Accelerate=c*Accelerate;
28 -      %地震波对应时间间隔
29 -      dt=delta(k,1);
30 -      %dt=Dt(k);
31 -      %精确法_N.C.Nigam&P.C.Jennings_1969
32 -      %生成谱使用SS校核
33 -      %function [MDis, MVel, MAcc, Dis, Vel, Acc]=SpectraResponse(dt, Accelerate, Tn, kesi)
34 -      % *****读入地震记录*****
35 -      count=length(Accelerate);
36 -      time=dt:dt:(count-0)*dt;%重新生成时间

```

图9 module1.m 文件

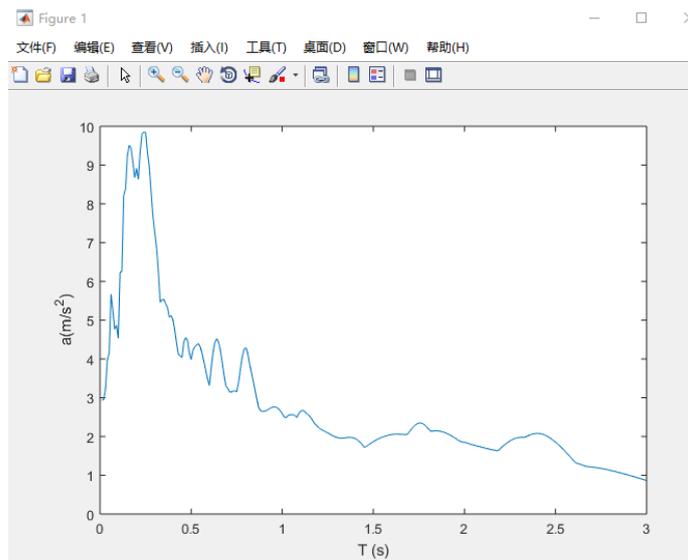


图10 加速度反应谱

2) 在 module2-a.tcl 中输入结构周期的范围、屈服比的范围, 将要调用的加速度反应谱.txt 文件和地震波.txt 文件放到和 module2-a.tcl 相同的目录下; 同样的在 module2-b.tcl 中输入结构周期的范围、屈服比的范围、屈服后刚度比的范围、 $\gamma_a$  的计算结果, 将要调用的加速度反应谱.txt 文件和地震波.txt 文件放到和 module2-b.tcl 相同的目录下; 分别将 module2-a.tcl 和 module2-b.tcl 的计算结果文件放到和 module2-c.m 同一个目录下。

```

module2-a.tcl
1 #文件说明—gamaa的求解
2 #---T=0.3-0.39s up=1.2-2.8 使用地震波平均加速度谱 (可改)
3 #单位: m,s, N
4 wipe
5
6 global data1
7 file mkdir data1
8 logFile data1/error.txt
9
10 #单自由度结构质量为1
11 set m 1
12 set g 9.81
13 set pi [expr 2*asin(1)]
14
15 #调用地震波平均加速度谱 (可改)
16 set Sa_file [open Sa.txt r ]
17 set a [gets $Sa_file ]
18 close $Sa_file
19
20
21 set aa 10000000000000000000
22
23 #设置周期取值范围 (可改)
24 set i 30
25 while {$i<=39} {
26
27     set T [expr $i*0.01];#定义单自由度结构周期
28     puts $i
29     puts $T
30
31
32     #生成不同屈服比的文件夹, 因为生成数据较多, 放在同一目录下matlab无法处理
33     global data-$T
34     file mkdir data-$T
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99

```

图 11 module2-a.tcl 文件

```

module2-b.tcl
1 #文件说明—gamab的求解
2 #---周期T=0.3-0.39s、屈服比up=1.2-2.8、屈服后刚度比v=0.1-0.5, 使用地震波平均加速度谱 (可改)
3 #单位: m,s, N
4 wipe
5
6 global data1
7 file mkdir data1
8 logFile data1/error.txt
9
10 #单自由度结构质量为1
11 set m 1
12 set g 9.81
13 set pi [expr 2*asin(1)]
14
15 #调用地震波平均加速度谱 (可改)
16 set Sa_file [open Sa.txt r ]
17 set a [gets $Sa_file ]
18 close $Sa_file
19
20
21 set aa 10000000000000000000
22
23 #设置周期取值范围 (可改)
24 set i 30
25 while {$i<=39} {
26
27     set T [expr $i*0.01];#定义单自由度结构周期
28     puts $i
29     puts $T
30
31     #生成文件夹
32     global data-$T
33     file mkdir data-$T
34
35
36     set K1 [expr 4*$pi*$pi*$m/$T/$T];#定义第一段刚度
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99

```

图 12 module2-b.tcl 文件

```

编辑器 - F:\2018年9月\专利\EEDP软件著作权\程序\module2-c.m
module2-c.m x +
1 - clear;
2 - clc;
3 - cc=importdata('x.out'); %读取文件
4 - a=reshape(cc,4,length(cc)/4);% 分别将16条(可改)地震波下对应的周期、屈服比,能量平衡系数,顶点位移进行排列
5 - ll=length(a); %计算文件a的长度
6 - %剔除掉相同的部分(可改)
7 - ll=ll/16;
8 - for t=1:ll
9 - bb=t*16;
10 - aa(:,t)=a(:,bb);
11 - end
12 - a=aa;
13 - %读取顶点位移的TXT文件
14 - namelist = dir('*.txt');
15 - file_name = {namelist.name};
16 - l = length(file_name);
17 - %选择出最大的位移值,并赋值到矩阵p
18 - p=[];
19 - for i=1:l
20 - x(i)= importdata(file_name(i));
21 - data0=x{i};
22 - data1=data0(:,2);
23 - p(i,1)=max(data1);
24 - i=i+1;
25 - end
26 - p=p'; %求矩阵p的转置
27 - aa=reshape(p,16,length(p)/16); %将16条地震波作用下的顶点位移放到一列(可改)
28 - b = mean(aa); %求各列的均值
29 - a(5,:)=b; %将矩阵b的值赋到矩阵a的第5行
30 - a(2,:)=fix(a(2,:)*10); %为了方便计算将矩阵a的第2行值扩大10倍
31 - out=[]; %新建一个矩阵out
32 - j=1;
33 - BB = a;

```

图 13 module2-c.m 文件

3) 在 module3.m 中输入各个参数, 分别是能量法计算得到的单自由度位移、桥墩的屈服位移、桥墩的质量和梁体质量。

```

编辑器 - F:\2018年9月\专利\EEDP软件著作权\程序\module3.m
module3.m x +
1 - %等效单自由度求解第一振型
2 - clc;
3 - clear;
4 - dm=0.04524795;%能量法计算得单自由度位移(可改)
5 - dpp=0.03559316;%桥墩屈服位移(可改)
6 - m1=246693.6593;%桥墩质量(可改)
7 - m2=1360200;%梁体质量(可改)
8 -
9 - a1=dm*m1-dpp*m1;
10 - b1=dm*m2;
11 - c1=-dpp*m2;
12 - d1=b1*b1-4*a1*c1;
13 - x=[(-b1+sqrt(d1))/(2*a1), (-b1-sqrt(d1))/(2*a1)];%x为支座大震下位移增量

```

图 14 module3.m 文件

4) 在 module4.m 中输入各个参数, 分别为桥墩刚度、桥墩质量、梁体质量、梁体-支座-桥墩双自由度结构的振型比。

```

编辑器 - F:\2018年9月\专利\EEDP软件著作权\程序\module4.m
module4.m
1 - clc
2 - clear
3 - %高铁桥梁双自由度BEDP已知振型求支座屈服后刚度
4 - %试算法
5 - k1=91772296.42;%桥墩刚度 (可改)
6 - m1=246693.6593;%桥墩质量 (可改)
7 - m2=1360200;%梁体质量 (可改)
8 - a=[0.764034356611711];%振型比 (可改)
9
10 - n=0.001:0.001:10;%刚度比例 (可改)
11 - for i=1:length(n)
12 -     k2=k1*n(i);
13 -     K=@(k2)[k1+k2 -k2;-k2 k2];
14 -     M=diag([m1 m2]);
15 -     [V,D]=eig(K(k2),M);
16 -     b=V(1,1)/V(2,1);
17 -     domg(i)=abs(a-b);%误差
18 - end
19 - plot(n,domg)
20 - k2=k1*n(abs(domg)==min(abs(domg)))%支座屈服后刚度
21 - T=2*pi*sqrt(m2/k2)%支座屈服后周期
22
就结 行 1 列 1

```

图 15 module4.m 文件

5) 在 module5.tcl 中输入梁体质量、桥墩质量、桥墩屈服前后的刚度和屈服力、支座滑动前后的刚度和滑动时的起滑力，建立梁体-支座-桥墩双自由度结构物理模型，对其进行时程分析，将计算结果与设计结果进行对比，得出设计误差。

```

module5.tcl
1 #桥墩、支座均采用双线性模型
2 #中震以桥墩进入屈服为目标进行支座设计
3 #支座采用双折线材料
4 #单位: m,s, N
5 wipe
6 global newtest4data
7 file mkdir newtest4data
8 logFile newtest4data/error.txt
9
10 set k 1
11 while {$k<=16} { #地震波的条数 (可改)
12
13 #梁体质量 (可改)
14 set m2 1360200.0
15 #桥墩质量 (可改)
16 set m1 246693.7
17 #重力加速度 (可改)
18 set g 9.81
19
20 #地震波文件峰值8度中震设防烈度为0.3g (可改)
21
22
23 set p [expr $g*$m2]
24
25
26 #桥墩初始刚度 (可改)
27 set Kp 91772296.42
28
29 #桥墩屈服剪力 (可改)
30 set Fyp 3266466
31
32 #桥墩屈服后刚度 (可改)
33 set Kyp 6608564
34
35 #支座滑动前刚度 (可改)
36 set K0b [expr $Kp*100]

```

Tool Command Langu length : 6,941 lines : 237 Ln : 36 Col : 23 Sel : 0 | 0 Windows (CR LF) UTF-8 INS

图 16 module5.tcl 文件