

基础隔震结构基于能量分析的仿真研究

熊仲明¹, 黄汉英¹, 韦俊^{1,2}, 秦培晟¹

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 苏州科技大学机电工程系, 江苏 苏州 215009)

摘要:以能量分析方法为基础, 结合基础隔震结构缩尺模型的振动台试验结果, 通过 Matlab/Simulink 仿真模拟工具建立了基础隔震体系的能量分析模型, 研究了纯摩擦滑移基础隔震结构在不同摩擦系数下输入能及能量分配差异, 分析了限位器性能与并联基础隔震结构能量分配的联系, 总结了地震动三要素(频谱, 幅值, 持时)对并联基础隔震结构的输入能和能量分配影响. 并通过对数值模拟与振动台试验结果的对比分析, 证实了该能量仿真方法在实际工程中运用的可行性, 为今后隔震体系的能量分析提供参考.

关键词:基础隔震结构; 能量分析; Matlab/Simulink 仿真模拟

中图分类号: TU352.1

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2017)03-0322-10

Simulation research for base-isolated structures based on energy analysis method

XIONG Zhongming¹, HUANG Hanying¹, WEI Jun^{1,2}, QIN Peisheng¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China)

Abstract:Based on energy analysis method, the energy model of base-isolated structure was established by the Matlab/Simulink simulation tool, the input energy and energy distribution difference of pure frictional sliding base-isolated structure under different friction coefficients was studied, the relation between the performance of the limiter and the energy distribution of the parallel base-isolated structure was analyzed, and the influence of three elements (spectrum, amplitude and duration) of ground motion on the input energy and energy distribution of the parallel base-isolated structure was summarized. By comparing the results of numerical simulation with shaking table test, the feasibility of the energy simulation method in practical engineering was proved, and research results could provide reference for the energy analysis of base-isolated structure in the future.

Key words:base-isolated structure; energy analysis; Matlab/Simulink simulation

20 世纪 50 年代, Housner G. W.^[1]首次提出了“能量分析”的概念, 并将能量平衡的关系应用到建筑结构的抗震分析与评估中, 但是由于技术手段和条件的限制, 初期的研究主要集中在概念的讨论和单自由度体系的计算分析上. 20 世纪 80 年代, 日本东京大学 Akiyama^[2]对结构的能量反应进行了较为系统的研究, 建立了较为完整的设计评估理论和设计方法; 20 世纪 90 年代, Fajfar P^[3]进行了非弹性能量谱的研究, 提出使用折减系数可以从弹性谱中获得非弹性谱的滞回能及输入能.

从能量角度研究结构在地震中的反应, 关键在于研究地震过程中结构的总输入能以及各种能

量之间的分配关系, 以此为基础才能进一步建立适用于实际结构的能量评估方法^[4]. Austin M^[5]结合能量概念分析了罕遇地震动下的基础隔震结构的输入能, 并依据建立的能量平衡方程提出了能量平衡的概念; Ryan K L^[6]为了不影响一阶模态响应且在高阶模态响应中能获得好的能量耗散结果, 提出在基础隔离建筑中用刚度分配阻尼代替 Rayleigh 阻尼; 程树良^[7]研究了地震输入能在换能隔震体系中的能量分配, 并于普通的隔震体系对比, 从能量的角度揭示了隔震换能体系的控制原理; 张颖等^[8]通过引入能量谱法, 分析了地震输入能在隔震层间的分配和耗散, 其研究表明基于能量平衡的分析方法是有效的减震手段; 王建

收稿日期: 2016-03-10

修改稿日期: 2017-05-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51278395); 住房和城乡建设部科学技术项目(2016-K5-044); 西安市科技攻关课题基金资助项目(GG04051)

作者简介: 熊仲明(1966—), 男, 教授, 博士, 主要从事结构抗震及土与结构共同作用研究. E-mail: 18792932183@163.com

强^[9]使用能量方法研究了安装摩擦摆系统的隔震结构, 并分析了多维地震动、地震强度、摩擦系数对结构输入能和势能的影响; 熊仲明等^[10]通过对多自由度滑移隔震结构的等代模型分析, 提出了滑移隔震结构能量分析的简化计算方法; 王亚楠^[11]基于能量平衡原理对近场地震作用下 TMD-基础隔震混合控制体系进行了能量响应分析, 研究了不同脉冲周期地震作用下混合控制体系的减震效果。

从上述研究中可看出, 目前缺少基于能量方法的基础隔震结构体系的数据仿真文献, 尤其对于限位器与摩擦垫并联基础隔震结构体系的能量分析更是未见文献。对此, 本文结合试验的结果, 基于 Matlab/Simulink 数值仿真工具^[12], 分析了纯摩擦基础隔震结构在不同摩擦系数下输入能及能量分配差异; 限位器性能对限位器与摩擦垫并联时的基础隔震结构的影响; 地震动三要素(幅值, 频谱, 持时)、对并联基础隔震结构能量反应的影响, 并综合数值模拟的能量分析结果, 其结果为滑移隔震体系的抗震评估方法提供了数据参考和理论依据。

1 基础滑移隔震结构仿真模型的建立

1.1 纯摩擦基础滑移隔震结构摩擦力模型的建立

隔震层摩擦力的数学方程为^[12]

$$F_f = \begin{cases} \text{sign}(\dot{x})F_{\text{sliding}}, & \dot{x} \neq 0 \\ F_{\text{sum}}, & \dot{x} = 0 \text{ 且 } |F_{\text{sum}}| < F_{\text{static}} \\ \text{sign}(F_{\text{sum}})F_{\text{static}}, & \dot{x} = 0 \text{ 且 } |F_{\text{sum}}| \geq F_{\text{static}} \end{cases} \quad (1)$$

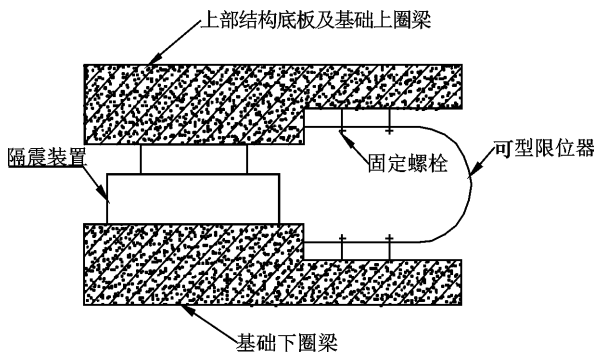


图1 U型限位装置

Fig. 1 Limiting device of U version

由于库伦摩擦力模型具有应用的广泛性, 确定上的准确性及使用上的简便性, 故本文仍选用非连续的库伦摩擦力模型作为滑移面的摩擦力模型。根据以上理论, 建立摩擦力的 Simulink 子模型, 其中 $\text{sign}(x)$ 为状态判别函数, F_{sliding} 滑动摩擦

力, F_{static} 为最大静摩擦力, $F_{\text{sum}} = m\ddot{x}$ 为隔震层静止时所受合力, \ddot{x}_g 为地震加速度, \dot{x}_1 和 x_1 为结构底层相对于隔震层的相对速度及位移。

1.2 带限位器的基础滑移隔震结构能量仿真模型的建立

选用 U 型环作为并联基础隔震的限位装置, 如图 1 所示。考虑到限位器双线性模型所给出的恢复力和位移关系曲线中存在拐点, 若在程序中分别定义弹性阶段的刚度和屈服后刚度, 使得程序的编写趋于复杂, 而且计算结果在拐点附近不太稳定。因此, 采用 Bouc-Wen 模型, 该恢复力模型是一光滑的曲线, 恢复力 P 由 P_E 和 P_H 两部分组成, 分别代表弹性恢复力和滞回力, P 的表达式为^[13]:

$$P = P_E + P_H = k_E x + k_H z = r k_{b1} x + (1-r) k_{b1} z \quad (2)$$

式中: k_{b1} 为限位器弹性刚度; $k_E = r k_{b1}$, $k_H = (1-r) k_{b1}$, r 为屈服后刚度 k_{b2} 与弹性刚度 k_{b1} 之比; x 为隔震层位移, P 为恢复力; z 为描述滞回特性的变量, 其变化范围为 $|z| \leq x_y$, 且当 $|z| = x_y$ 时, 表明此时处于屈服阶段, x_y 为结构屈服位移。

根据以上理论, 在隔震层的仿真模型中加入限位器双线性滞回曲线模型的仿真模块。

2 滑移隔震结构能量反应及评价指标系数

2.1 滑移隔震结构能量反应仿真模型的建立

在基础隔震结构多自由度体系运动微分方程的两端同乘速度向量的转置, 并在地震动持时范围 $[0, t]$ 内进行积分, 可以得到如下式简写以焦耳为量纲的能量反应方程^[2,10]。

$$E_k + E_c + E_h + E_e + E_d = E_{in} \quad (3)$$

其中: E_{in} 为结构总输入能, E_k 为结构动能, E_c 为上部结构阻尼耗能, 上部结构变形能(上部结构弹性应变能 E_e 和非弹性变形耗能 E_h 之和), E_d 为隔震层耗能。根据上述能量平衡方程, 当地震反应结束时, 结构的动能 E_k 和弹性应变能 E_e 都将趋于零, 能量平衡方程变为:

$$E_c + E_h + E_d = E_{in} \quad (4)$$

为了更好地分析基础滑移隔震结构在地震作用时各部分耗能所占的比例, 并根据式(3)、(4)在 Matlab/Simulink 中建立能量的仿真模型, 如图 2—图 3 所示, 输出能量参数同公式(3)、(4)。输入参数 x_{1vc} 表示上部结构位移速度, x_{0vc} 表示隔震层位移速度, x_g 表示地震加速度, F_{input} 表示在地震作用下上部结构在地震作用下的合力。

在 400 gal 的 El-Centro 波作用下, 带 U 型限

位器的隔震层滞回曲线如图 4 所示, 隔震层水平恢复力为摩擦力和 U 型限位器水平恢复力叠加的结

果, 滞回曲线对角大致呈 45 度, 曲线饱满耗能效果显著。

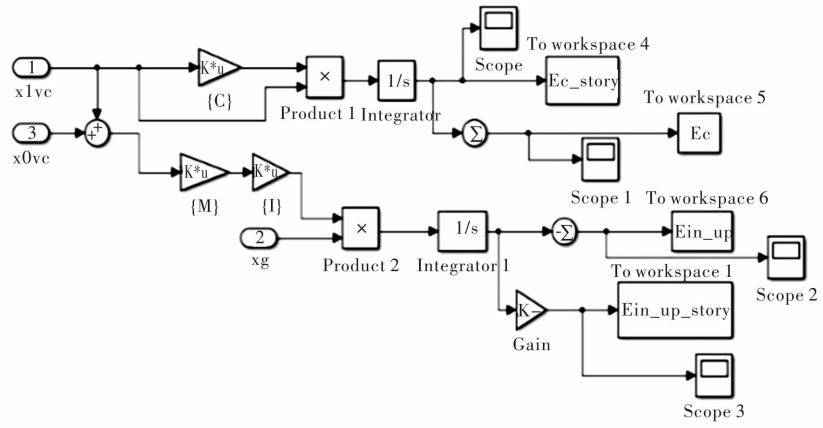


图 2 上部结构的阻尼耗能及地震动输入能量仿真子模型

Fig. 2 The superstructure subsystem of the damping energy dissipation and input energy

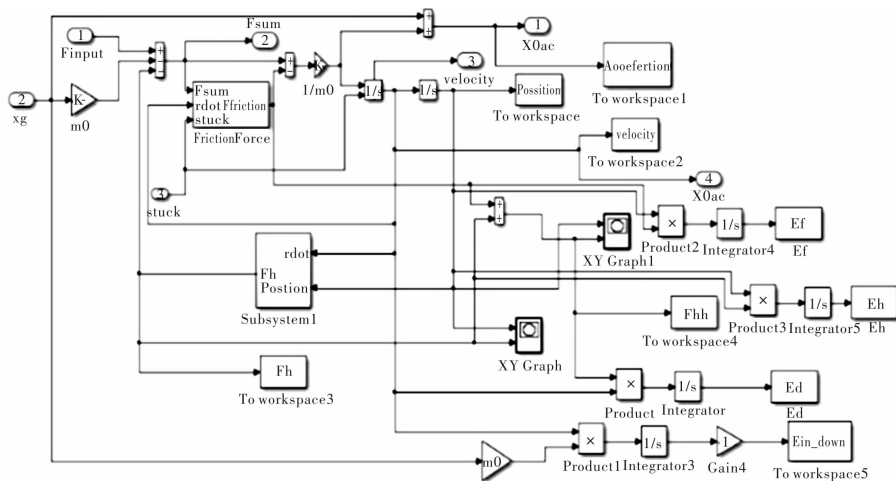


图 3 隔震层的滞回耗能及地震动输入能量仿真子模型

Fig. 3 The isolated layer subsystem of the hysteric energy and input energy

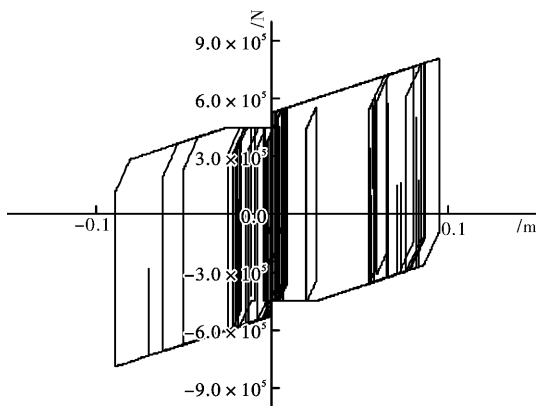


图 4 带 U 型限位器隔震层滞回曲线(400 gal)

Fig. 4 Hysteretic curve of isolation layer with limiting stopper

2.2 基础隔震结构能量反应的评价指标系数

为了更好地分析评价各部分能量在总输入能中所占的比重以及在不同因素条件下的影响关系, 特定义能量分配系数如下^[4]:

上部结构阻尼耗能比:

$$\lambda_c = \frac{E_c}{E_{in}} \quad (5)$$

隔震层滞回耗能比:

$$\lambda_d = \frac{E_d}{E_{in}} \quad (6)$$

能量隔震率:

$$\eta = \frac{E_{stuck} - E_{sliding}}{E_{stuck}} \times 100\% \quad (7)$$

式中: η 为能量隔震率; E_{stuck} 为基础固定时结构总输入能量; $E_{sliding}$ 为隔震层滑动时结构总输入能量。隔震率 η 越大, 隔震效果越好。

3 工程概况及结果对比

3.1 工程概况

通过与试验结果进行比较来验证计算模型的正确性, 本文选用工程结构为 5 层框架试验缩尺模型,

如图 5 所示. 模型缩尺比为 1 : 5, 柱距为 1.2 m, 首层层高为 0.84 m, 2 层~5 层层高均为 0.72 m, 总高度为 3.72 m, 模型高宽比为 1.55. 首层板厚 0.2 m, 基础板厚为 0.1 m, 采用欠人工质量模型设计. 振动台试验模型的制作和设计见文献[15], 模型构件尺寸及配筋如表 1 所示.

在相同参数下, 表 2 是根据缩尺试验模型施加不同烈度 El-Centro 波作用在结构的加速度与本文采用仿真模拟的数值对比结果.

由上表数据分析可知: 无论 200 gal 还是 400 gal 的地震波作用下, 仿真模拟计算结果均大于试验结果. 括号中为二者数值结果的误差百分比, 均维持在 10% 左右, 表明仿真模型的误差在可接

受范围, 故本文采用仿真模拟的计算模型是可行的.



图 5 框架结构试验模型

Fig. 5 Frame structure test model

表 1 模型构件尺寸及配筋

Tab. 1 Model component dimension and reinforcement

部件	编号	尺寸/mm	构件配筋
柱	Z1(1 层)	150×150	10Φ6+8Φ4; Φ2@20/40(2)
	Z2(2 层~5 层)	120×120	4Φ6+8Φ4; Φ2@20/40(2)
	KL(2~5 层)	60×120	2Φ6+Φ4; 3Φ6; N4Φ4; Φ2@20/40(2)
梁	WKL(屋面)		3Φ6; 3Φ6; N4Φ4; Φ2@20/40(2) Φ2@20/40(2)
	L(2~5 层)	40×80	2Φ6; 2Φ4; Φ2@20/40(2)
	WL(屋面)		2Φ6; 2Φ6; Φ2@20/40(2)
板	B(2~屋面)	40	T&B; Φ4@40

表 2 不同烈度 El-Centro 波作用在结构上计算结果与试验结果的对比

Tab. 2 Comparison of the computational result and experimental result

地震波	工况	隔震层	1 层	2 层	3 层	4 层	5 层
200 gal	基础固定计算结果	—	0.32	0.49	0.65	0.72	0.91
	基础固定试验结果	—	0.29(10%)	0.45(9%)	0.58(12%)	0.66(9%)	0.82(11%)
	滑移结构计算结果	0.20	0.25	0.22	0.32	0.39	0.50
	滑移结构试验结果	0.18(11%)	0.23(8%)	0.20(9%)	0.29(10%)	0.35(11%)	0.46(9%)
400 gal	基础固定计算结果	—	0.55	0.76	1.19	1.18	1.46
	基础固定试验结果	—	0.52(6%)	0.70(8%)	1.05(13%)	1.08(9%)	1.30(12%)
	滑移结构计算结果	0.30	0.26	0.24	0.30	0.40	0.50
	滑移结构试验结果	0.26(15%)	0.24(8%)	0.22(9%)	0.28(7%)	0.37(8%)	0.47(6%)

4 基础滑移隔震结构基于 Simulink 结果分析

4.1 纯摩擦滑移隔震结构的地震能量分析

选用峰值加速度为 400 gal 的 El-Centro 和 Taft 波作为仿真模型的输入波, 通过数值分析得到图 6—图 8 的数据结果.

El-Centro 波和 Taft 波作用下不同摩擦系数的总输入能 E_{in} 时程曲线及耗能比 λ_c 和 λ_d 变化曲线如图 6—图 7 所示. 其中 inf 代表摩擦系数值为 ∞ , 表明该结构为基础固定结构.

由图 6—图 8 分析可知: (1)随着摩擦系数的增大, 结构的总输入能 E_{in} 逐渐增加, 不同摩擦系数下的时程曲线基本一致. 摩擦系数越小, E_{in} 越

小, 能量隔震率 η 越大, 表明隔震效果越好. 摩擦系数增大到 0.15 时, η 的值不到 10%, 随着摩擦系数增大, 总输入能基本保持一个水准线上. (2) 随着摩擦系数的增大, 其 λ_d 在减小, 而 λ_c 在增加, 表明隔震层的耗能效率越来越低. λ_c 和 λ_d

的变化曲线交于 0.2 左右. 摩擦系数小于 0.2 时, λ_d 大于. (3) 从图中看出 $E_c + E_d$ 与 E_{in} 并不完全相等, 相对误差在 0.5% 左右, 这是由于非弹性变形能 E_h 的影响, 说明基础隔震结构塑性部分耗能只占很小比例.

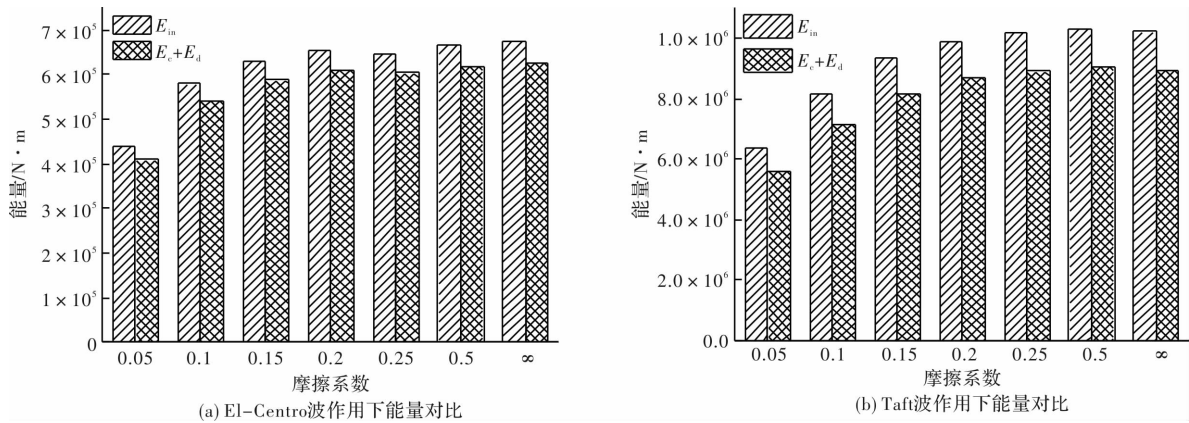


图 6 不同地震波下能量对比

Fig. 6 Energy comparison under different seismic wave

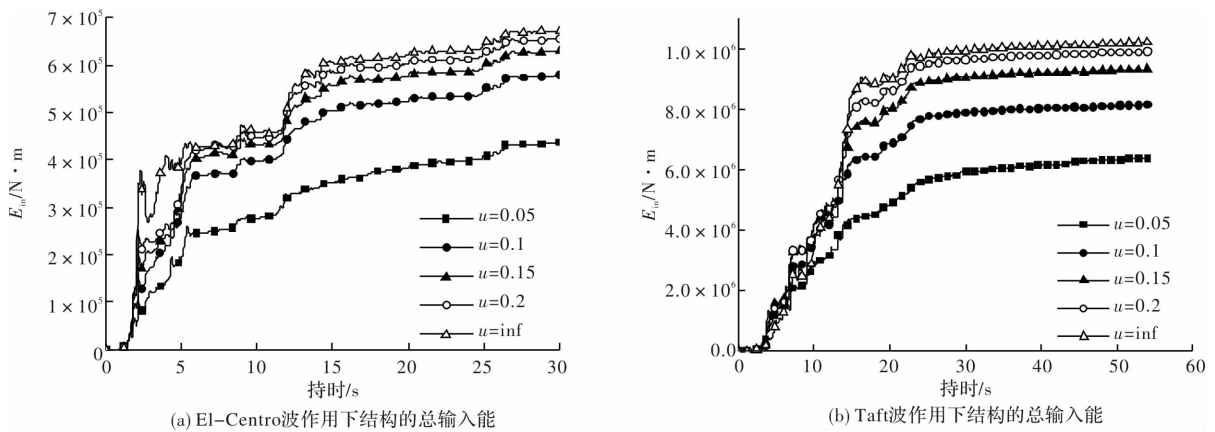


图 7 不同地震波下结构总输入能

Fig. 7 Structural input energy under different seismic wave

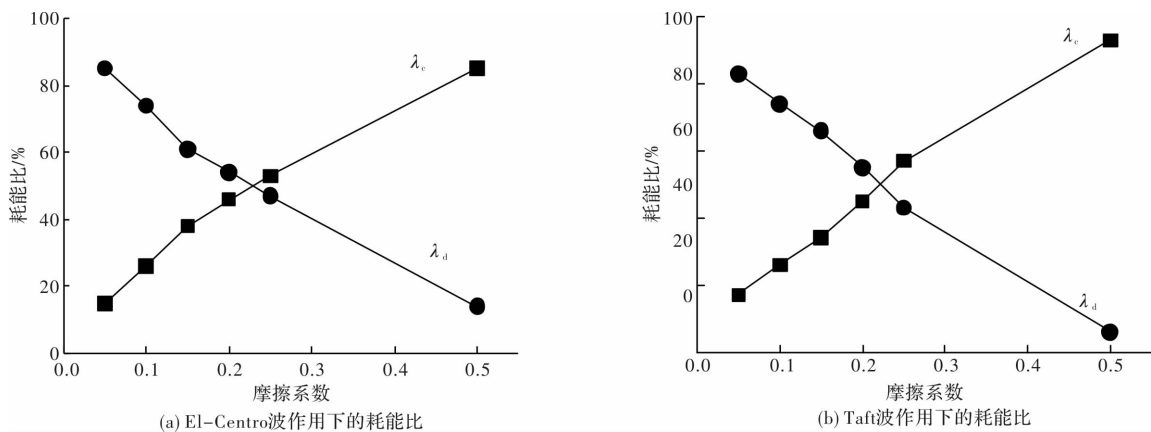


图 8 不同地震波下结构耗能比

Fig. 8 Structural energy consuming ratio under different seismic wave

4.2 限位器与摩擦垫并联基础隔震结构的地震能量分析

采用已调幅的 El-Centro 和 Taft 波(400 gal)输入到仿真模型中, 以观察限位器与摩擦垫并联基础隔震结构的总输入能量及耗能分配的差别, 并通过改变限位器刚度以观察能量分配情况. 限位器分为屈服刚度保持不变, 屈服后刚度发生变化, 如表 3 中 LS1—LS3 号限位器; 另一种为屈服后刚

度保持不变, 屈服刚度发生变化, 如表 3 中 LS4—LS6 号限位器^[14]. 由于两种波的影响趋势一致, 故选取 El-Centro 波分析, 其总输入能在不同摩擦系数及不同参数限位器下的能量如图 9(a)所示, 其中 Friction 代表纯摩擦作用.

由于能量的分配比例在不同摩擦系数下的趋势相同, 为便于结果的分析, 本文选取摩擦系数为 0.1 的工况进行分析, 如图 9(b、c)所示.

表 3 限位器参数数据表
Tab. 3 Parameters of the limiting stopper

限位器 型号	弹性刚度 /N · m ⁻¹	屈服后刚度 /N · m ⁻¹	刚度比	屈服 位移/m	屈服 强度/N	极限 位移/m	极限 强度/N	非线性 系数
LS 1	0.2 * 1.6E+8	4.8E+6	0.15	0.006	1.92E+5	0.065 3	476 590	3.11E-1
LS 2	0.2 * 1.6E+8	3.2E+6	0.10	0.006	1.92E+5	0.064 5	379 310	4.13E-1
LS 3	0.2 * 1.6E+8	1.6E+6	0.05	0.006	1.92E+5	0.073 3	299 650	5.59E-1
LS 4	0.133 * 1.6E+8	3.2E+6	0.15	0.006	1.28E+5	0.074 8	348 120	2.87E-1
LS 5	0.2 * 1.6E+8	3.2E+6	0.10	0.006	1.92E+5	0.064 5	379 310	4.13E-1
LS 6	0.4 * 1.6E+8	3.2E+6	0.05	0.006	3.84E+5	0.062 2	563 910	5.84E-1

为分析并联基础隔震结构的能量时程分配情况, 选取 LS1 号限位器参数进行模拟, 输入 400 gal 的 El-Centro 波, 摩擦系数设为 0.05. 其中隔震层耗能 E_d 分为摩擦耗能 E_f 和限位器限位耗能 E_h 之和, 能量分配时程图如 10 所示.

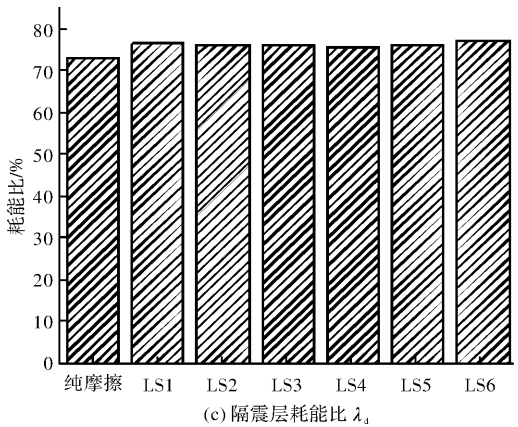
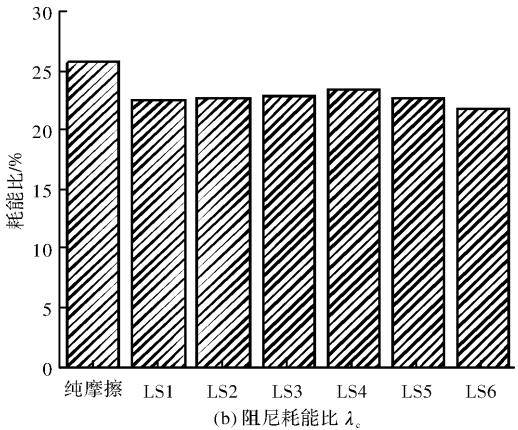
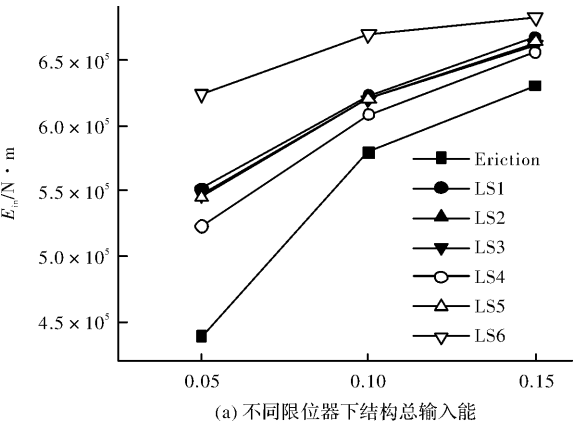
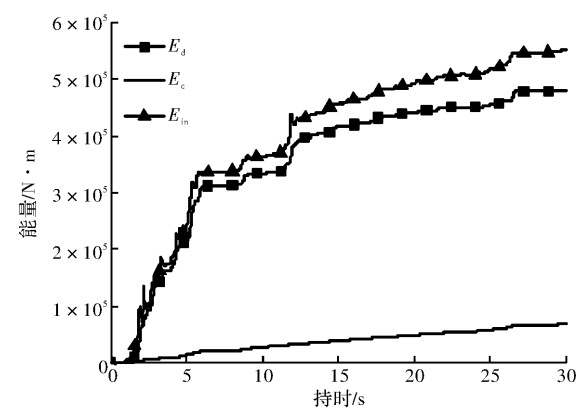
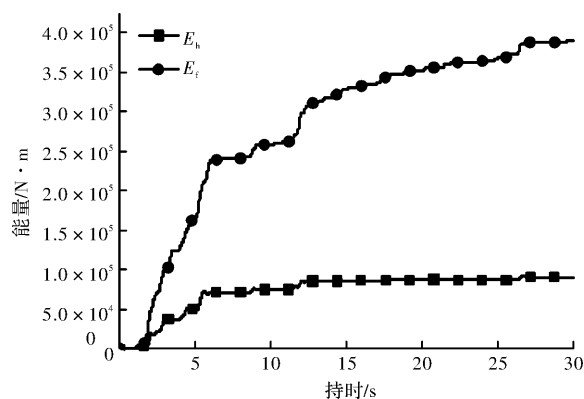


图 9 El-Centro 波不同限位器下结构总输入能及阻尼耗能比 λ_c 与隔震层耗能比 λ_d 的关系
Fig. 9 Structural input energy, Energy consuming ratio of the damping and isolated layer with different limiting stopper under El-Centro wave

通过图 9—图 10 分析可以得到: (1)不同型号限位器作用下的总输入能 E_{in} 随着摩擦系数的增加而有不同幅度的增大. (2)比较限位器 LS1—LS3 下结构的能量分配情况, 可知这三种限位器下结构的 E_{in} 、 λ_c 、 λ_d 相差不大, 对于屈服后刚度相差较大的 LS1 和 LS3 号限位器, 可知屈服后刚度较大的 LS1 号限位器下 E_{in} 、 λ_d 总体上要大些, λ_c 要小些. (3)比较限位器 LS4—LS6 下结构的能量分配情况, 可知限位器的初始弹性刚度越大, 其对应的 E_{in} 、 λ_d 越大, λ_c 越小.



(a) 隔震结构能量分配曲线



(b) 隔震层能量分配曲线

图 10 能量分配时程曲线

Fig. 10 Time history curve of energy distribution

4.3 地震动三要素对并联基础隔震结构能量分配的影响

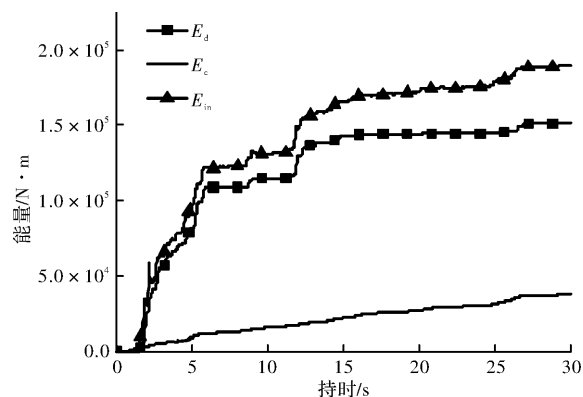
由于并联基础隔震结构的隔震层隔离和吸收了大部分的地震能量,上部结构的结构变形能 E_Y 很小,故不考虑上部结构的滞回耗能,把上部结构视为刚体,地震总输入能 E_{in} 全部由隔震层滞回耗能 E_d 和上部结构的阻尼耗能 E_c 来平衡. 并联基础隔震结构仿真选取 LS1 号限位器参数进行模拟,摩擦系数设为 0.05.

4.3.1 地震动幅值对并联基础隔震结构能量分配的影响

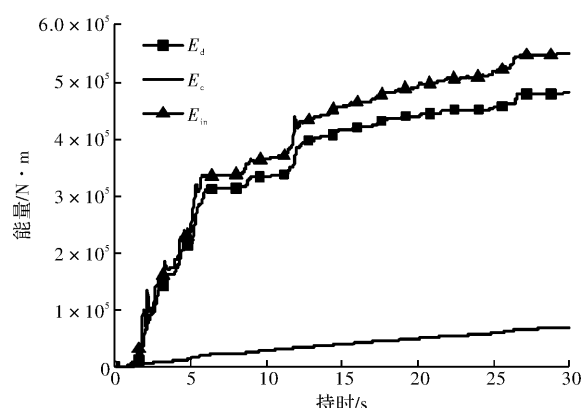
选用 El-Centro 波将其加速度峰值按一定比例分别调整到 220 gal、400 gal、620 gal,为便于比较,地震持时均取整个地震波时长. 其地震输入能及其它能量之间的关系如图 11 所示.

由图 11 可知:(1)不同地震烈度的能量谱曲线大致相似,地震波加速度幅值越大,输入到结构的总能量也就越大,从而上部结构的阻尼耗能和隔震层耗能也相应增大.(2)9 度罕遇地震作用时,隔震层的耗能比(El-Centro: 91.33%)均大于 7 度和 8 度罕遇地震,隔震效果最佳. 在高烈度地震作用下,并联基础隔震结构隔震层位移较大导致摩

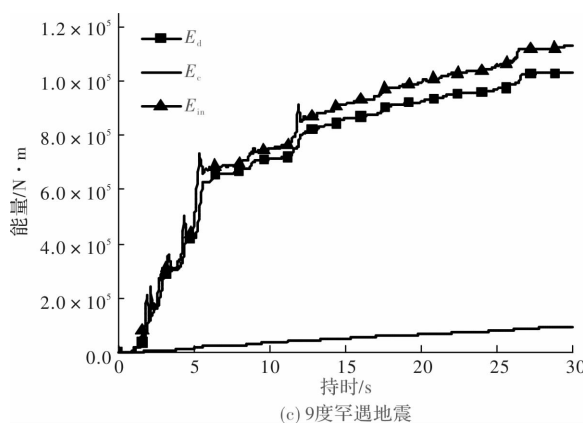
擦垫充分耗能,且限位元件能够完全进入弹塑性耗能阶段,故此时隔震层滞回耗能最大.



(a) 7度罕遇地震



(b) 8度罕遇地震



(c) 9度罕遇地震

图 11 不同烈度 El-Centro 波下能量曲线

Fig. 11 Energy curve under different intensities El-Centro wave

4.3.2 地震动频谱特性对并联基础隔震结构的能量分配的影响

考虑地震动频谱特性中的地震卓越周期对结构能量分配的影响,采用 PEER 数据库选取的 4 类场地地震动记录,每类场地均选取 10 条地震动作用下的能量反应并取其平均值,为使得结果更具有可比性,将其加速度峰值调为 8 度罕遇地震作用大小(400 gal),地震持时均为 40 s,其中并联基础隔震结构仿真模型的等效自振周期为 1.17 s. 如图 12 所示为不同波作用下能量时程曲线.

由图 12 分析可知: 结构累计总输入能随着场地类别增大而不断增加, 由于软土地基改变了输入地震动的频谱特性, 软弱地基条件下土层的滤波效应使得基底地震动的频谱组成中低频成分得到加强, 当输入地震动的频谱特性以低频分量为主时, 地基表层的地震动主频率越接近隔震结构的自振频率, 共振效应的影响也不断增强, 同时隔震结构的地震反应也会不断增大, 地震能量向

上部结构传递也持续增加。

4.3.3 地震动持时对并联基础隔震结构的能量分配影响

选用 El-Centro 和 Taft 两条典型地震波, 将其加速度峰值均调整为 8 度罕遇地震下所对应的峰值大小(400 gal), 地震持时为整个地震波时长, 计算并联基础隔震结构在不同持时条件下的能量分配如图 13 所示。

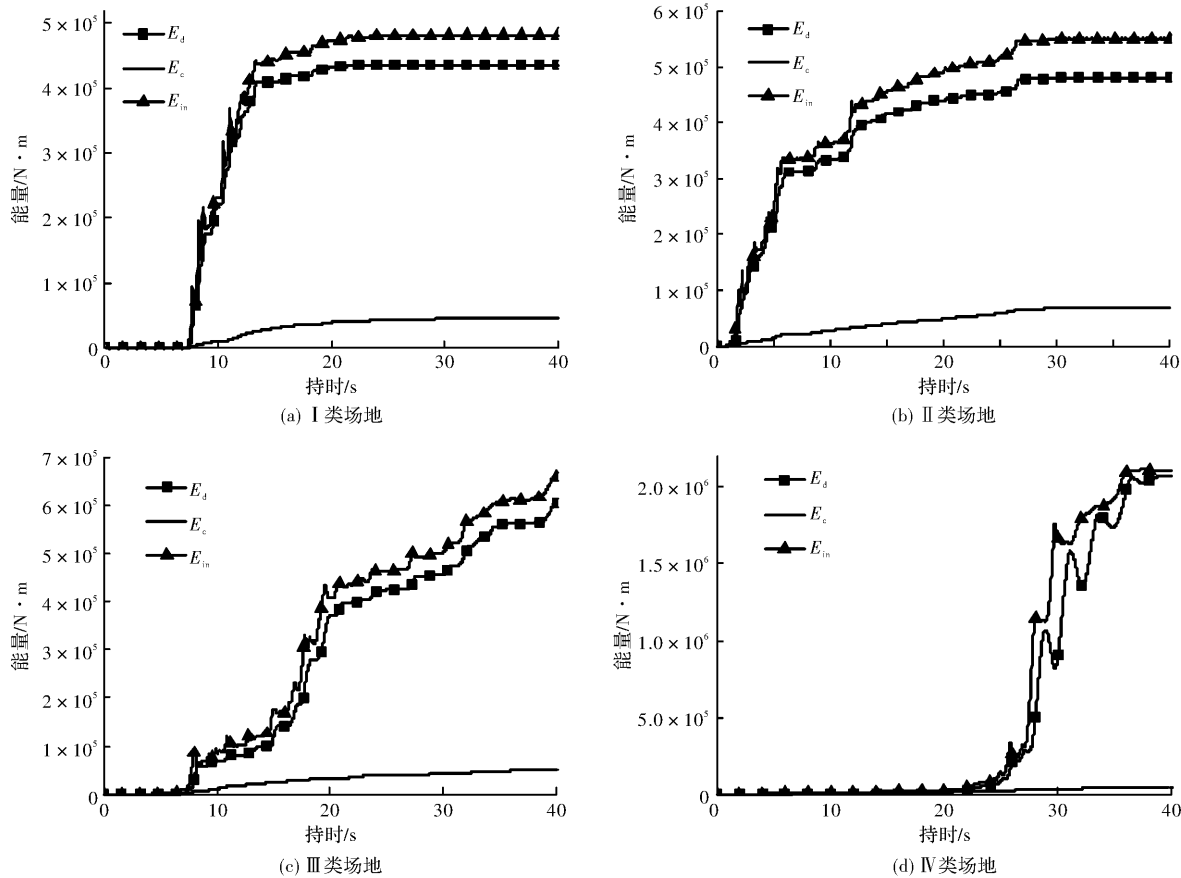


图 12 不同场地下结构能量时程曲线

Fig. 12 Structural energy time-history curve under different seismic wave

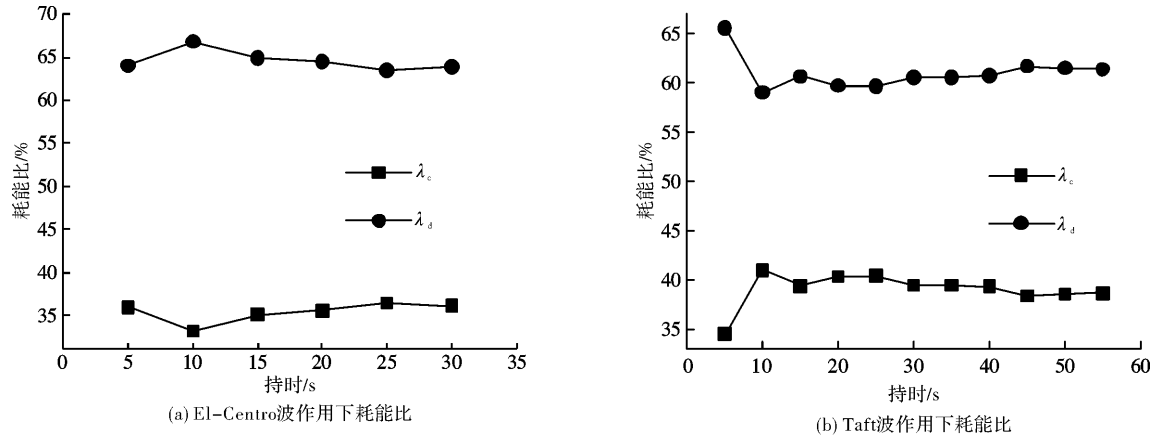


图 13 不同地震波作用下结构的耗能比

Fig. 13 Structural energy consuming ratio under different seismic wave

经分析可知: 地震动持时对能量分配有一定的影响. 地震波加速度越大, 隔震层滞回耗能比 λ_d

也越大, 当地震波加速度达到峰值时, 隔震层滞回耗能比 λ_d 也达到最大值(El-Centro 波在 10 s 附

近, Taft波在5 s附近), 说明隔震层对能量输入具有调节作用, 最后随着持时继续增加, λ_d 逐渐趋于稳定.

5 结论

以能量分析方法为基础, 通过 Matlab/Simulink 数值仿真工具分析了影响基础隔震结构的主要因素, 得出以下结论:

(1) 计算结果表明, 摩擦系数 $\mu \geq 0.15$ 时结构的隔震效果较差, 为了发挥隔震层的摩擦耗能, 应尽量选择小于 0.15 的摩擦系数. 地震结束后, 发现总输入能和总耗散不完全相等, 这是由于少量的结构非弹性变形能的影响, 说明基础滑移隔震结构还是偏于安全的.

(2) 限位器的初始弹性刚度不变而仅仅改变屈服后刚度对地震能量分配影响较小. 选择相应的限位装置时, 若从总的输入能及耗能比例来看, 应优先选择初始弹性刚度不变而屈服后刚度较大或者初始刚度较大而屈服后刚度不变的限位器.

(3) 并联基础隔震结构对高烈度地震有更好的隔震效果, 且在结构设计时, 应当根据地震强度合理选择和布置滑移隔震元件及限位装置. 地震波的卓越周期与结构自振周期越接近, 结构总输入能越大, 从而使得更多的限位耗能元件进入塑性耗能阶段, 故基础滑移隔震结构不适合建造在卓越周期较长的场地上.

参考文献 References

- [1] HOUSNER G W. Limit design of structures to resist earthquake[C]//California: Proceedings of 1st World Conference on Earthquake Engineering, 1956.
- [2] AKIYAMA. 基于能量平衡的建筑结构抗震设计[M]. 叶列平, 裴星洙, 译. 北京: 清华大学出版社, 2010. AKIYAMA. Earthquake resistant structural design based on energy balance [M]. YE Lieping, PEI Xing-zhu Translated. Beijing: Publishing House of Tsinghua University, 2010.
- [3] FAJFAR P, VIDIC T. Consistent inelastic design spectra: hysteretic and input energy [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1994, 23(5): 523-537.
- [4] 覃高明. 滑移隔震结构体系动力灾变行为评估方法研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2012. QIN Gaoming. The study on evaluation method of dynamiccataclysm behavior of sliding isolated structure system [D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2012.
- [5] AUSTIN M, LIN W. Energy balance assessment of base-isolated structures [J]. Journal of Engineering Mechanics, 2004, 130(3): 347-58.
- [6] RYAN K L, Polanco J. Problems with rayleigh damping in base-isolated buildings [J]. Journal of Structural Engineering. 2008, 134(11): 1780-4.
- [7] 程树良, 孙作玉, 王焕定. 隔震换能结构体系的能量分析[J]. 地震工程与工程振动. 2004, 24(3): 179-184. CHENG Shuliang, SUN Zuoyu, WANG Huand-ing. Energy analysis for base-isolated structure with transducer system [J]. Earthquake engineering and Engineering vibration, 2004, 24(3): 179-184.
- [8] 张颖, 谭平, 周福霖. 层间隔震结构的能量平衡[J]. 应用力学学报. 2010, 27(1): 204-208. ZHANG Ying, TANG Ping, ZHOU Fuling. An analysis method for story base-isolated structures base on energy balance [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2010, 27(1): 204-208.
- [9] 王建强, 赵卓, 丁永刚, 等. 多维地震动作用下摩擦摆基础隔震结构能量反应分析[J]. 振动与冲击, 2011, 30(5): 241-244. WANG Jianqiang, ZHAO Zhuo, DING Yonggang. et al. Energy response analysis for base-isolated structures with a friction pendulum system under multi-axial ground motions [J]. Journal of Vibration and Shock. 2011, 30(5): 241-244.
- [10] 熊仲明, 张萍萍, 韦俊, 等. 滑移隔震结构基于能量分析的简化计算方法研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2012, 44(3): 305-309. XIONG Zhongming, ZHANG Pingping, WEI Jun, et al. Study on the simplified method of energy analysis based on sliding isolation structure[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2012, 44(3): 305-309.
- [11] 王亚楠, 李慧, 杜永锋. TMD-基础隔震混合控制体系在近场地震作用下能量分析及减震效果分析[J]. 振动与冲击. 2014, 33(4): 204-209. Wang Yanan, LI Hui, DU Yongfeng. Energy response and anti-vibration effect analysis for a base-isolated structure with TMD under near-field earthquake [J]. Journal of Vibration and Shock. 2014, 33(4): 204-209.
- [12] 薛定宇, 陈阳泉. 基于 Matlab/Simulink 的系统仿真技术和应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012. XUAN Dingyu, CHEN Yangquan. Technology and application of matlab/simulink system simulation [M]. Beijing: Publishing House of Tsinghua University, 2012.

- [13] 刘伟庆,章征涛. 结构抗震控制的动态仿真分析方法研究[J]. 防灾减灾工程学报,2004,20(4):382-388.
LIU Weiqing, ZHANG Zhengtao. Research on the method of dynamic simulation for seismic controlled structures [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering,2004,20(4):382-388.
- [14] 姚谦峰. 软钢 U 型带片的限位、消能性能分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),1997,29(1):22-26.
YAO Qianfeng. Behavior of mild U-shaped steel plate restraining displacement and absorbing energy[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition),1997,29(1):22-26.
- [15] 刘军生. 摩擦滑移隔震框架结构试验与设计方法研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2015.
LIU Junsheng. Test and design method research of friction sliding isolation for frame structure[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2015.
- (编辑 吴海西)

(上接第 316 页)

- [6] 李龙军,王晓峰,杨宾锋,等. 基于力磁耦合的金属磁记忆检测机理与仿真[J]. 空军工程大学学报(自然科学版),2012,13(3):85-89.
LI Longjun, WANG Xiaofeng, YANG Binfeng, et al. Based on the magnetic force coupling mechanism of metal magnetic memory testing and simulation [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2012,13(3):85-89.
- [7] 徐滨士,董丽红. 再制造质量控制中的金属磁记忆检测技术[M]. 北京:国防工业出版社,2015,10:2-3.
XU Bingshi, DONG Lihong. Metal magnetic memory testing method in remanufacturing quality control[M]. Beijing: Nation Defense Industry Press, 2015, 10:2-3.
- [8] 李津,槐创锋. ANSYS15.0 有限元分析自学手册[M]. 北京:人民邮电出版社,2015.
LI Jin, HUAI Chuangfeng. ANSYS15.0 finite element analysis of self-study handbook [M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2015.
- [9] 谢龙汉,李杰鸿. ANSYS 电磁场分析[M]. 北京:电子工业出版社,2015.
XIE Longhan, LI Jiehong. ANSYS electromagnetic field analysis[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2015.
- [10] 张涛. ANSYS APDL 参数化有限元分析及其应用实例[M]. 北京:中国水利水电出版社,2013.
ZHANG Tao. ANSYS APDL parametric finite element analysis and application examples [M]. Beijing: China Water Power Press, 2013.
- [11] 魏英杰. 基于微磁原理的钢丝绳无损检测方法研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2012.
WEI Yingjie. Method research on nondestructive testing for wire ropes based on the micromagnetic theory[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2012.
- [12] 任吉林,林俊明. 电磁无损检测[M]. 北京:科学出版社,2008.
REN Jilin, LIN Junming. Electromagnetic nondestructive testing [M]. Beijing: Science Press, 2008.
- (编辑 吴海西)