

文章编号: 1673-9469 (2018) 04-0001-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2018.04.001

基于多岛遗传算法的自由曲面层合壳铺层优化

肖志, 伞冰冰

(河海大学土木与交通学院, 江苏南京 210098)

摘要: 采用多岛遗传算法, 以自振频率最大为优化目标, 对自由曲面层合壳的铺层顺序进行优化研究。其中, 自由曲面层合壳的几何形状通过非均匀有理 B 样条 (NURBS) 进行建模, 结构有限元模型的创建和自振频率的计算通过 ANSYS 完成, 多岛遗传算法通过软件 Isight 实现, 并与 ANSYS 连接实现铺层顺序优化。最后, 通过算例分别对正高斯、负高斯、正负高斯曲率自由曲面层合壳进行优化分析, 获得了最优的铺层顺序。算例结果表明, 提出的优化自由曲面层合壳铺层顺序方法是准确、有效的。

关键词: 自由曲面; 层合壳; 铺层顺序优化; 自振频率; 多岛遗传算法

中图分类号: TU33

文献标识码: A

Stacking sequence optimization of free-form FRP shells based on the multi-island genetic algorithm

XIAO Zhi, SAN Bingbing

(College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: An approach to maximize the fundamental frequency of free-form FRP shells using the multi-island genetic algorithm is proposed in this paper. The geometry of free-form FRP shells is generated by the NURBS technique. The creation of structural finite element model and the calculation of the fundamental frequency are carried out by ANSYS. The multi-island genetic algorithm is embedded in Isight and stacking sequence of the free-form FRP shell is optimized by using Isight to integrate ANSYS. Finally, three free-form FRP shells with the positive, negative, positive and negative Gaussian surface are optimized to obtain the optimum stacking sequence. The numerical examples show that the proposed method for stacking sequence optimization of free-form FRP shells is accurate and effective.

Key words: free-form surface; FRP shells; stacking sequence optimization; fundamental frequency; multi-island genetic algorithm

由于纤维增强复合材料 (FRP) 具有轻质、高强度和可设计性强等特点, 在航空航天、土木、汽车等领域得到了广泛的应用。层合壳结构是一种常见的由纤维增强复合材料构成的结构形式。对于层合壳结构, 铺层顺序是影响其力学性能的主要因素之一。目前, 已有许多学者对层合壳结构的铺层顺序进行了优化研究^[1-3]。但是, 这些研究大多局限于板和常规的曲面壳, 如柱壳等。随着 FRP 结构在大型公共建筑^[4]和飞行器^[5]等工程领域的不断推广, 常规形

状的板壳结构因其形状限制, 已不能满足要求。在这种情况下, 自由曲面层合壳的应用和研究逐渐引起重视。“自由曲面”是指既不能用数学公式表示, 又不能通过常规形式的曲面组合而成的曲面^[6]。目前针对自由曲面层合壳的铺层顺序优化研究还很少。

综上, 本文将对自由曲面层合壳的铺层顺序展开优化研究, 研究以自振频率最大为优化目标, 通过非均匀有理 B 样条技术 (NURBS) 进行自由曲面几何建模, 通过有限元软件 ANSYS 进行自振频率

收稿日期: 2018-08-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51578211)

作者简介: 肖志 (1993-), 男, 江苏盐城人, 硕士研究生, 从事自由曲面层合壳的优化研究。

计算,采用多岛遗传算法进行优化问题的求解。采用本文方法对三种典型的自由曲面层合壳(正高斯、负高斯、正负高斯曲率自由曲面层合壳)进行优化研究。

1 优化问题的描述

本文优化研究的目标函数是最大化自由曲面层合壳结构(图1)的一阶自振频率,因为一阶自振频率是结构重要的动力特性。优化变量是自由曲面层合壳结构的每一层的铺层角度 θ 。图2所示为,取图1结构的一微块,建立材料坐标系-1,2,3与局部坐标系 $-X', Y', Z'$,用以定义铺层角度,区别于图1中整体(结构)坐标系 $-X, Y, Z$ 。以顺着纤维方向为1轴,以垂直纤维的方向为2轴,以垂直于12平面方向为3轴,局部坐标系为ANSYS中的单元坐标系,其中3轴与 Z' 轴重合。 θ 定义为1轴与 X' 轴之间的夹角值,逆时针为正。根据实际的复合材料的常见取值,本文只考虑四个方向的铺层,即 $0^\circ, \pm 45^\circ, 90^\circ$ 铺层。因此,本文的优化问题可表述为:

$$\begin{aligned} & \text{Max: } f \\ & \theta_i (i = 1, 2, \dots, n) \\ & \text{S.t: } \theta_i \in \{0^\circ, \pm 45^\circ, 90^\circ\} \end{aligned}$$

其中 f 为一阶自振频率,为自由曲面层合壳第 i 层的铺层角度, n 为自由曲面层合壳的总层数。

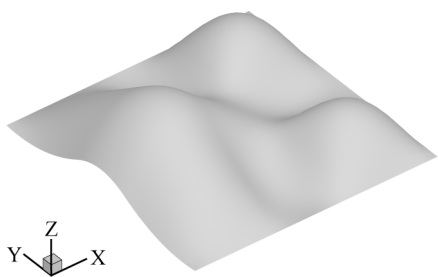


图1 自由曲面层合壳结构
Fig.1 Free-form FRP shell

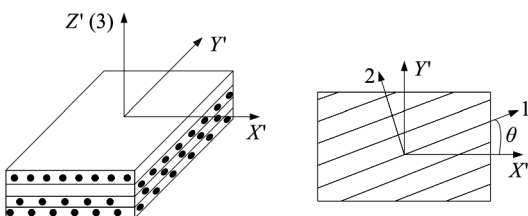


图2 层合壳的铺层角度
Fig.2 Fiber ply angles of FRP shell

2 数值优化的方法

2.1 自由曲面几何建模方法

NURBS可以对曲线和曲面进行精确的参数化的描述。这些曲线曲面不仅包括常见的可以用数学公式表达的形状,也包括自由不规则的形状。由NURBS生成的曲线曲面很光滑,形状也很多样。NURBS是在B样条的基础上引入权因子,并以有理分式的形式表示。NURBS曲面定义为:

$$S(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n P_{i,j} \cdot w_{i,j} \cdot N_{i,k}(u) \cdot N_{j,l}(v)}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n w_{i,j} \cdot N_{i,k}(u) \cdot N_{j,l}(v)} \quad (1)$$

其中, (m, n) , (k, l) , $(N_{i,k}(u), N_{j,l}(v))$ 分别表示样条基函数的个数、次数和在 (u, v) 方向上的基函数。 $P_{i,j} = (P_{i,j(x)}, P_{i,j(y)}, P_{i,j(z)})$ 表示某个控制点的直角坐标, $w_{i,j}$ 是每个点坐标对应的权因子。

基于上述NURBS方法,本文采用Fortran语言编制了自由曲面的几何建模程序。在该程序中输入初始控制点坐标等信息,即可输出自由曲面几何模型。

2.2 结构自振频率的计算

结构的一阶自振频率计算通过ANSYS实现。在ANSYS中,模态分析被用于结构固有频率和振型的计算分析。模态分析属于线性分析,在分析过程中只考虑线性行为。ANSYS的模态分析过程包含以下四个步骤:建模、加载及求解、扩展模态、后处理。其中,步骤加载及求解中求解选项的定义主要使用MODOPT和MXPAND这两个命令。MODOPT用来定义模态分析方法、模态数目、频率范围、模态归一化控制等。MXPAND用来定义模态扩展数目、频率范围、单元计算控制等。ANSYS的模态分析中提供了七种模态的提取方法,即分块兰索斯法、子空间迭代法、缩减法、Power Dynamic法、非对称矩阵法、阻尼法和QR阻尼法。本文利用ANSYS进行模态分析时采用分块兰索斯法。它是ANSYS默认的求解方法,适用于大型对阵矩阵特征值的求解问题,也适用于壳模型的求解问题。

2.3 多岛遗传算法

遗传算法模拟了自然界中生物遗传和进化的过程,是一种全局优化的概率搜索方法。但是传统的

遗传算法存在“早熟”现象^[7]，即容易收敛于局部最优解。多岛遗传算法是基于传统遗传算法的一种改进的遗传算法。它将整个种群分解为多个子群，这些子群被称为“岛”。在每个“岛”上独立地进行传统的遗传操作(选择、交叉、变异)。每隔一定的代数，在“岛”之间进行个体的交换，被称为迁移操作。通过迁移操作，在优化过程中，优化解的多样性得以保证。所以多岛遗传算法克服了“早熟”的缺陷^[8]，同时其并行计算的方式也提高了计算效率，非常适合于复杂的非线性优化问题。

多岛遗传算法是内嵌于 Isight 中的。Isight 是一个将优化过程集成化和自动化的设计平台。本文利用 Isight 集成 ANSYS 的优化过程如下：

第一步：根据数值模型的要求，确定控制点的数量和坐标、NURBS 函数的相关参数，利用 NURBS 创建自由曲面层合壳的几何模型。

第二步：设定模型初始的铺层层数、厚度和角度。

第三步：设置单元类型、材料特性、截面参数和边界条件，对几何模型进行有限元划分。

第四步：利用多岛遗传算法进行优化：(1)以铺层角度为随机变量，随机生成初始代个体；(2)对每个个体进行有限元建模；(3)利用 Ansys 进行自振频率计算；(4)执行多岛遗传算法的操作(选择、交叉、变异、迁移)，进行优化。

第五步：判断此时是否达到优化代数。若达到优化代数，则停止优化，输出最优解；若未达到优化代数，则返回第四步，继续进行优化。

3 算例

自由曲面按形状分类一般可分为正高斯曲率自由曲面、负高斯曲率自由曲面和正负高斯曲率自由曲面等。本文就选取这三种典型的自由曲面层合壳进行优化研究。三个自由曲面层合壳模型，材料均为典型的碳/环氧树脂(T300/7901)，材料参数如表1所示。层合壳每一单层的厚度为1.25 mm，共16层。此外，层合壳铺层均假定为对称的铺层形式，即壳中面上下各对应层的铺层角度相同。多岛遗传算法的参数设置如表2所示。层合壳的有限元分析使用 ANSYS 中提供的 SHELL181 单元，这是一个四节点的壳单元，每个节点有6个自由度。NURBS 基函数的取2次样条函数，即公式(1)中 $k, l=2$ 。

表1 T300/7901 复合材料的材料参数

Tab.1 Material parameters of T300/7901

$E_1/$ GPa	$E_2/$ GPa	$E_3/$ GPa	$G_{12}/$ GPa	$G_{13}/$ GPa	$G_{23}/$ GPa	μ_{12}	μ_{13}	μ_{23}	ρ /($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
138	11	11	6	6	3.7	0.28	0.28	0.4	1 690

注：1、2、3表示材料主方向， E 、 G 、 μ 分别表示弹性模量、剪切模量和泊松比， ρ 表示质量密度。

3.1 正高斯曲率自由曲面层合壳

正高斯曲率自由曲面层合壳的控制点布置如图3所示，控制点坐标如表3所示，形状如图4所示。该模型的几何参数为：曲面长宽均为1.6 m，中间凸起处高度为0.4 m。边界条件为四边三向铰支。图5为此模型各代一阶自振频率的最大值及平均值随代数的进化史。由图5可知，综合来看，优化过程在第10代左右收敛。优化后的铺层顺序为[45/0/-45/90/-45/45/0/90]_s，一阶自振频率平均值与最大值分别为495.48 Hz和503.51 Hz。而初始代的平均值和最大值分别为467.55 Hz和499.39 Hz，相比之下，经过优化，分别增大了5.64%和0.83%。

3.2 负高斯曲率自由曲面层合壳

负高斯曲率自由曲面层合壳的控制点布置如图3所示，控制点坐标如表4所示，形状如图6所示。该模型的几何参数为：曲面长宽均为1.6 m，左右边

表2 多岛遗传算法的参数设置表

Tab.2 Parameters of the multi-island genetic algorithm

参数	数值
进化代数	30
岛屿个数	10
岛屿上的个体数	10
迁移间隔	5
交叉概率	1.0
变异概率	0.01
迁移概率	0.01

表3 正高斯曲率自由曲面层合壳的控制点坐标

Tab.3 Control point coordinates of positive Gaussian free-form FRP shell

控制点	坐标 / m	控制点	坐标 / m
P1	(0, 0, 0)	P6	(0.8, 1.6, 0)
P2	(0, 0.8, 0)	P7	(1.6, 0, 0)
P3	(0, 1.6, 0)	P8	(1.6, 0.8, 0)
P4	(0.8, 0, 0)	P9	(1.6, 1.6, 0)
P5	(0.8, 0.8, 0.4)		

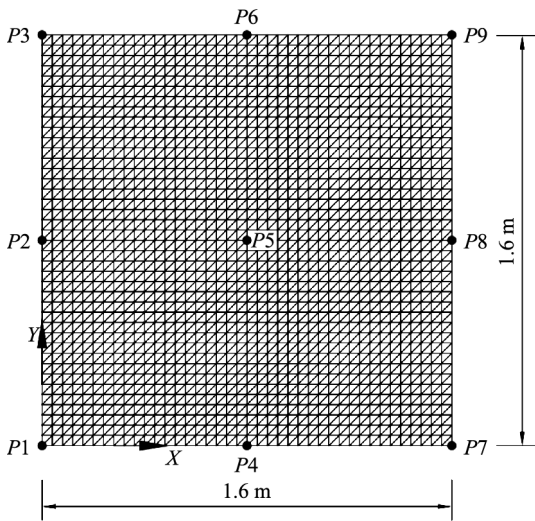


图3 正高斯曲率自由曲面层合壳的控制点网格
Fig.3 Control point grid of positive Gaussian free-form FRP shell

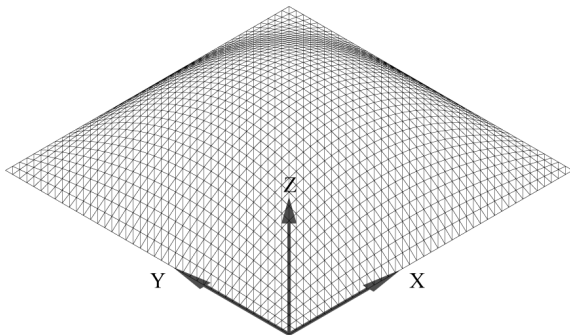


图4 正高斯曲率自由曲面层合壳
Fig.4 Positive Gaussian free-form FRP shell

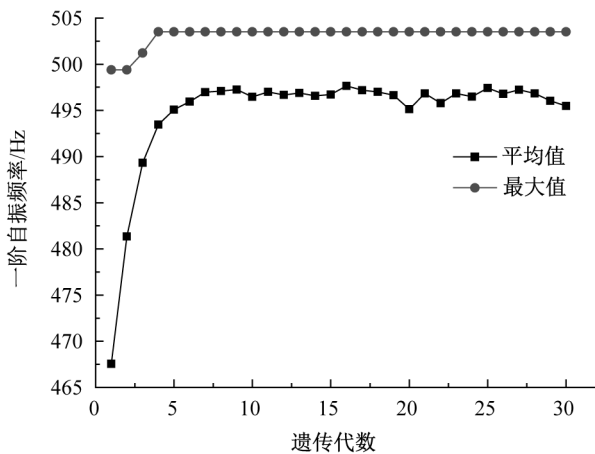


图5 正高斯曲率自由曲面层合壳的收敛过程
Fig.5 Convergence process of positive Gaussian free-form FRP shell

界中心高度为 0.6 m, 中间凹陷处高度为 0.3 m。边界条件为前后两对边三向铰支。图 7 为该模型各代最大及平均的一阶自振频率随代数的进化历史。由图 7 可知, 综合来看, 此优化过程在第 25 代左右就已收敛。最优的铺层顺序为 [-45/90/-452/90/02/45]_s,

表 4 负高斯曲率自由曲面层合壳的控制点坐标
Tab.4 Control point coordinates of negative Gaussian free-form shell

控制点	坐标 / m	控制点	坐标 / m
P1	(0, 0, 0)	P6	(0.8, 1.6, 0)
P2	(0, 0.8, 0.6)	P7	(1.6, 0, 0)
P3	(0, 1.6, 0)	P8	(1.6, 0.8, 0.6)
P4	(0.8, 0, 0)	P9	(1.6, 1.6, 0)
P5	(0.8, 0.8, 0.3)		

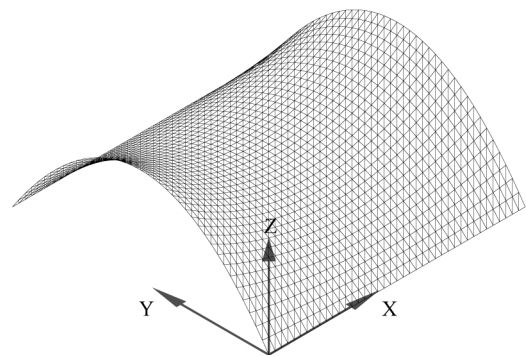


图6 负高斯曲率自由曲面层合壳
Fig.6 Negative Gaussian free-form shell

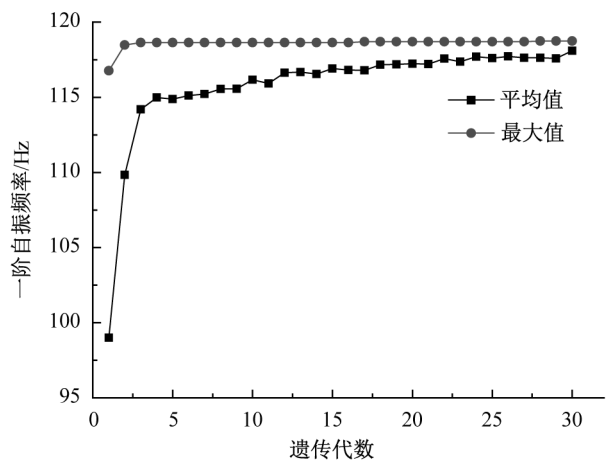


图7 负高斯曲率自由曲面层合壳的收敛过程
Fig.7 Convergence process of negative Gaussian free-form shell

一阶自振频率平均值与最大值分别为 118.09 Hz 和 118.74 Hz。而初始代的平均值和最大值为 99.00 Hz 和 116.76 Hz, 相比之下, 经过优化, 分别增大了 19.28% 和 1.70%。

3.3 正负高斯曲率自由曲面层合壳

正负高斯曲率自由曲面层合壳的控制点布置如图 8 所示, 控制点坐标如表 5 所示, 形状如图 9 所示。该模型的几何参数为: 曲面长为 2 m, 左右宽为 1.2 m, 正中间宽为 0.8 m, 左右边界处

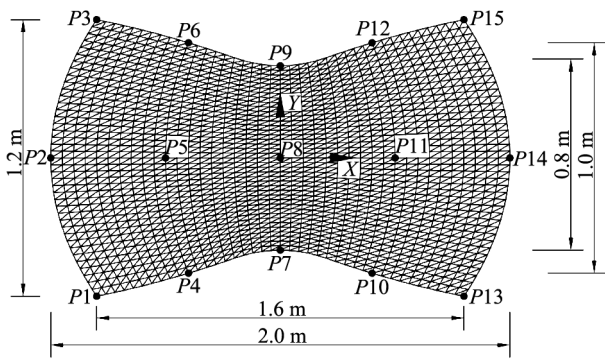


图8 正负高斯曲率自由曲面层合壳的控制点网格
Fig.8 Control point grid of positive and negative Gaussian free-form shell

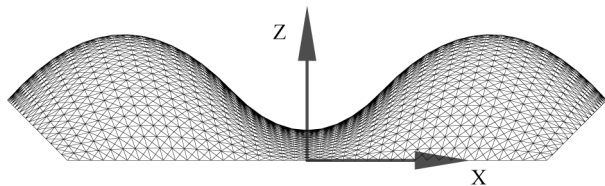


图9 正负高斯曲率自由曲面层合壳
Fig.9 Positive and negative Gaussian free-form shell

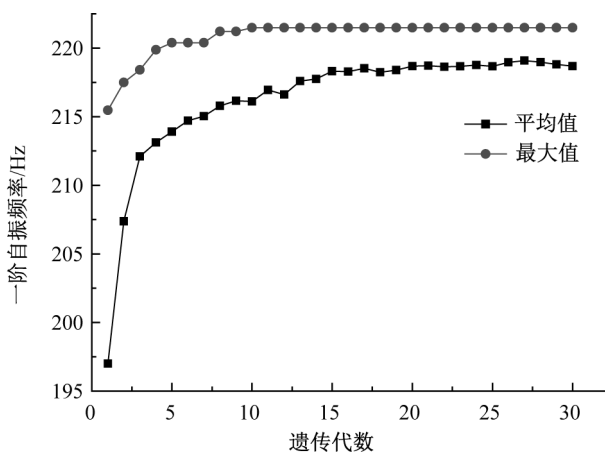


图10 正负高斯曲率自由曲面层合壳的收敛过程
Fig.10 Convergence process of positive and negative Gaussian free-form shell

高度为0.2 m，凸起处高度为0.4 m，中间凹陷处高度为0.1 m。边界条件为前后两长跨方向三向铰支。图10为该模型各代一阶自振频率的最大值及平均值随代数的进化史。由图10可知，该优化过程在第20代左右已经收敛。最优的铺层顺序为[03/90/-45]_s，一阶自振频率平均值与最大值分别为218.69 Hz和221.48 Hz。而初始代的平均值和最大值为197.00 Hz和215.47 Hz，相比之下，经过优化，分别增大了11.01%和2.79%。

表5 正负高斯曲率自由曲面层合壳的控制点坐标
Tab.5 Control point coordinates of positive and negative Gaussian free-form shell

控制点	坐标 / m	控制点	坐标 / m
P1	(-0.8, -0.6, 0)	P9	(0, 0.4, 0)
P2	(-1, 0, 0.2)	P10	(0.4, -0.5, 0)
P3	(-0.8, 0.6, 0)	P11	(0.5, 0, 0.4)
P4	(-0.4, -0.5, 0)	P12	(0.4, 0.5, 0)
P5	(-0.5, 0, 0.4)	P13	(0.8, -0.6, 0)
P6	(-0.4, 0.5, 0)	P14	(1, 0, 0.2)
P7	(0, -0.4, 0)	P15	(0.8, 0.6, 0)
P8	(0, 0, 0.1)		

4 结论

1) 本文采用多岛遗传算法，以结构一阶自振频率最大为优化目标，以三个典型的自由曲面层合壳结构为主要研究对象。三个结构的优化分别在第10代，第25代和第20代收敛，这表明本文采用的多岛遗传算法具有良好的收敛性，本文的优化方法具有较高的计算效率和实用性。

2) 通过优化分析，正高斯曲率自由曲面层合壳的一阶自振频率在最终代的平均值和最大值分别提高了5.64%和0.83%，负高斯曲率自由曲面层合壳分别提高了19.28%和1.70%，正负高斯曲率自由曲面层合壳分别提高了11.01%和2.79%。三个模型的最优铺层顺序分别是[45/0/-45/90/-45/45/0/90]_s，[-45/90/-45/2/90/0/2/45]_s和[03/90/-45]_s。该结论可为实际自由曲面层合壳结构的设计提供依据。

参考文献:

[1] 唐文艳, 顾元宪, 赵国忠. 复合材料层合板铺层顺序优化遗传算法 [J]. 大连理工大学学报, 2004, 44(2): 186-189.

[2] 修英姝, 崔德刚. 复合材料层合板稳定性的铺层优化设计 [J]. 工程力学, 2005, 22(6): 212-216.

[3] LE-MANH T, LEE J. Stacking sequence optimization for maximum strengths of laminated composite plates using genetic algorithm and isogeometric analysis [J]. Composite Structures, 2014, 116(1): 357-363.

[4] 冯鹏. 复合材料在土木工程中的发展与应用 [J]. 玻璃钢/复合材料, 2014(9): 99-104.

[5] 马晓永, 范召林, 吴文华, 等. 基于NURBS方法的机翼气动外形优化 [J]. 航空学报, 2011, (下转第10页)

2) 刚性地基条件下体系的自振周期最小, 软弱土地基条件下的自振周期最大。

3) 无论是否考虑土与结构相互作用效应的普通结构的第一阶周期都和抗震规范规定的场地特征周期很接近, 在地震时容易发生共振, 造成严重的震害。

4) 无论是否考虑土与结构相互作用效应的并联基础隔震结构的第一阶周期均大幅避开了场地特征周期, 能够有效地减轻结构地震反应, 达到良好的隔震效果。

总体来说, 通过比较分析个模型的前五阶自振频率和周期, 发现考虑土与结构相互作用效应对普通结构自振特性的影响远大于并联基础隔震结构的自振特性, 且场地土的条件越差影响的程度也越大。

参考文献:

- [1] 张培震. 中国地震灾害与防震减灾 [J]. 地震地质, 2008, 30(3): 577-583.
 [2] 薛素铎, 赵均, 高向宇. 建筑抗震设计 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.

[3] PARMELEE R A. Building-foundation interaction effects during earthquakes [J]. Journal of the Engineering Mechanics Division, 1967, 93: 131-152.

[4] NOVAK M, HENDRESON P. Base-isolated building with soil-structure interaction [J]. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 1989, 18(6): 751-765.

[5] 于旭, 庄海洋, 朱超. 基于模型试验的软夹层与刚性地基上隔震结构体系耗能特性分析 [J]. 振动与冲击, 2016, 35(10): 73-82.

[6] 杨高中. 刚性地基上梁桥震害与分析 [J]. 华东公路, 1981(S1): 17-43.

[7] 李慧, 王亚楠, 杜永峰. 土-结构动力相互作用对基础隔震结构的影响 [J]. 工程抗震与加固改造, 2012, 34(1): 75-81.

[8] 李国豪. 工程结构抗震动力学 [M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1980.

[9] 郑永来, 周橙, 黄炜, 等. 动态弹性模量的实验研究 [J]. 河海大学学报: 自然科学版, 1998(2): 31-35.

(责任编辑 王利君)

(上接第5页)

32(9): 1616-1621.

[6] 沈世钊, 武岳. 结构形态学与现代空间结构 [J]. 建筑结构学报, 2014, 35(4): 1-10.

[7] HU X, CHEN X, ZHOU Y, et al. Optimization design of satellite separation systems based on Multi-Island Genetic Algorithm [J]. Advances in Space Research, 2014,

53(5): 870-876.

[8] CHEN H, OOKA R, KATO S. Study on optimum design method for pleasant outdoor thermal environment using genetic algorithms (GA) and coupled simulation of convection, radiation and conduction [J]. Building & Environment, 2008, 43(1): 18-30.

(责任编辑 王利君)