

基于递阶遗传算法的结构非接触形状控制

张晓飞¹, 郑世杰¹, 王宏涛²

- (1. 南京航空航天大学 航空宇航学院 机械结构力学及控制国家重点实验室, 南京 210016;
2. 南京航空航天大学 机电学院, 南京 210016)

摘 要: 以 PLZT 光致伸缩层合梁非接触形状控制问题为研究对象, 提出了一种结合结构拓扑优化与递阶遗传算法的控制方法. 该方法以 PLZT 光致伸缩驱动器的拓扑分布和照射的光强值为设计变量, 以 PLZT 光致伸缩层合梁的期望形状与控制形状的差值函数为适应度函数, 应用结构拓扑优化、递阶遗传算法和有限元法, 优化了 PLZT 光致伸缩驱动器的分布和所照射的光强值. 与基于传统遗传算法的形状控制方法的计算结果进行了对比分析, 该方法的进化速度提高了 91% 以上, 所控制的结构形状与期望形状的误差较传统遗传算法降低了 76% 以上.

关 键 词: 非接触形状控制; 结构拓扑优化; 递阶遗传算法; 有限元法; PLZT 光致伸缩驱动器
中图分类号: V214.37 **文献标志码:** A

Structure of non-contact shape control based on hierarchical genetic algorithms

ZHANG Xiao-fei¹, ZHENG Shi-jie¹, WANG Hong-tao²

- (1. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures,
College of Aerospace Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
2. College of Mechanical and Electrical Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Taking the non-contact shape control of a beam bonded with PLZT photostrictive actuators on its surface as an object, a control method was proposed by combining the structural topology optimization and hierarchical genetic algorithms. In this method, the topological distribution of photostrictive actuators and the light intensity were chosen as design variables, and the shape errors between the desired shape and the achieved shape of beam bonded with PLZT photostrictive actuators were taken as the fitness function. The distribution of PLZT photostrictive actuators and the light intensity were optimized by using structural topology optimization, hierarchical genetic algorithms and finite element method. The performance of the presented method for shape control was assessed in comparison with that of the conventional genetic algorithm. The results demonstrate that the speed of the evolution of the presented method has been improved by more than 91% and the errors between the desired shape and the achieved shape have been reduced by over 76% compared with the conventional genetic algorithm.

Key words: non-contact shape control; structural topology optimization;
hierarchical genetic algorithms; finite element method;
PLZT photostrictive actuators

近年来在精密控制与测量、航空航天以及精密仪器等研究领域,对结构形状精度的要求越来越高,甚至达到了纳米级。在这样严格的形状控制精度要求下,传统的设计方法在现行的分析、设计条件下显然是不可行的,因此结构设计过程中如何实现非接触形状控制成了当前需要重点研究的问题。国内外在基于压电陶瓷的形状控制方面开展了大量研究,其中大部分工作都集中于压电片上电压的优化分布^[1-9]。Liu 等^[10]提出先优化电压分布,再优化驱动器拓扑,通过反复迭代实现驱动器、电压分布的二重优化设计。基于压电驱动器的形状控制易受电磁噪声干扰且附加设备复杂,在实现空间智能结构形状控制的过程中呈现出较大的局限性,而基于铁电陶瓷材料镧改性锆钛酸铅陶瓷(PLZT)的光致伸缩驱动器在强光照射下具有光致伸缩效应,因此将其层合于柔性结构上可以实现非接触形状控制。国内外的一些学者对 PLZT 光致伸缩层合结构的非接触形状控制问题进行了相关的研究,文献[11-12]分别从解析和数值分析的角度研究了光致伸缩驱动器的尺寸和其在基体结构的位置对诱导的位移大小的影响。Sun 和 Tong^[13]对光致伸缩层合梁结构形状控制中的光强分布进行了优化研究。Luo 等^[14]为了达到最优的形状控制,认为光致伸缩驱动器和基体结构享有同样的拓扑形式,将拓扑优化方法用于光致伸缩层合板形状控制的优化设计。最近,李书阳等^[15]利用有限元法和传统遗传算法优化了照射在 PLZT 光致伸缩驱动器上的光强大小,研究了光致伸缩层合梁的非接触形状控制问题。目前,对于同时优化 PLZT 光致伸缩驱动器的层合位置和光强值还鲜有研究,现有的非接触控制方法对于 PLZT 光致伸缩驱动器层合的位置往往依据常识和经验进行判断,缺乏科学性和规律性。为了解决这一问题,本文结合结构拓扑优化、递阶遗传算法和有限元法,提出了一种同时优化 PLZT 光致伸缩驱动器的位置、数量和光强大小的形状非接触主动控制方法。

1 光-电-力-热耦合有限元建模

光电单元的有限元方程可表示为^[16]

$$\mathbf{K}_e \mathbf{U}_e = \mathbf{F}_u^e + \mathbf{F}_{ue}^e \quad (1)$$

其中 $\mathbf{K}_e$ 为单元刚度矩阵; $\mathbf{U}_e$ 为单元节点位移矢量; $\mathbf{F}_u^e$ 和 $\mathbf{F}_{ue}^e$ 分别为外力引起的和由光照引起的等效节点力矢量; $\mathbf{K}_e \cdot \mathbf{U}_e$, $\mathbf{F}_u^e$ 的计算方法与常规有

限元完全相同, $\mathbf{F}_{ue}^e$ 可表示为

$$\mathbf{F}_{ue}^e = \int_v \mathbf{B}_u^T \mathbf{e}^T E d\mathbf{v} \quad (2)$$

式中 $\mathbf{B}_u$ 为常规有限元中的应变位移矩阵; $\mathbf{e}$ 为压电应力常数矩阵; E 为紫外光照射诱导的光致电场强度。 t_j 时刻的光致电场强度可表示为^[17]

$$E(t_j) = E_l(t_j) + E_\theta(t_j) \quad (3)$$

其中

$$E_l(t_j) = [E_s - E_l(t_{j-1})] \frac{\alpha}{\alpha_s} I(t_j) e^{-(\alpha/\alpha_s) I(t_j) \Delta t} \Delta t -$$

$$E_l(t_{j-1}) \beta e^{-\beta \Delta t} \Delta t + E_l(t_{j-1}) \quad (4)$$

$$E_\theta(t_j) = \frac{P_n}{\epsilon} \theta(t_j) \quad (5)$$

$$\theta(t_j) = \theta(t_{j-1}) + \frac{[I(t_j)P - \gamma \theta(t_{j-1})] \Delta t}{(H + \gamma \Delta t)} \quad (6)$$

其中 $E_l(t_j)$, $E_\theta(t_j)$ 为 t_j 时刻的光生电场强度和热释电次生电场强度; E_s 为 PLZT 光致伸缩驱动器的饱和电场强度; $E_l(t_{j-1})$ 为 Δt 时间段内剩余常量光强所产生的电场强度; α 为 PLZT 光致伸缩驱动器常数; α_s 为纵横比; $I(t_j)$ 为 t_j 时刻的光照强度; Δt 为时间步; β 为电压泄漏常数; P_n 为热释电常数; ϵ 为介电常数; $\theta(t_j)$ 为 t_j 时刻光致伸缩驱动器结构的温度; P 为吸热能; γ 为热导率; H 为光致伸缩驱动器的热容量。

2 递阶遗传算法

遗传算法是一类以 Darwin 自然进化论和 Mendel 遗传变异理论为基础的求解复杂全局优化问题的仿生型算法。为了更好地发挥遗传算法的仿生特性,并且让个体染色体编码携带尽可能多的信息,人们提出了模拟人类染色体基因表达层次结构的递阶编码方式,并将采取这种编码方式来进行遗传运算的算法称作递阶遗传算法^[18]。在递阶遗传算法中染色体包含两部分:控制基因和参数基因,其中控制基因处于上级,而参数基因处于下级,上级基因控制下级基因的表达。

控制基因一般采用二进制编码,每一位对应一个参数基因编码,本文中控制基因为“0”和“1”组成的数字串,控制基因的长度与可能的 PLZT 光致伸缩驱动器的最大个数相同,其每一位对应一个可能的光电单元的分布信息和一段参数基因编码。若控制基因编码为“0”,则表示对应位置上无层合 PLZT 光致伸缩驱动器且对应的参数基因处于休眠状态;若编码为“1”,则表示对应位置上有层合 PLZT 光致伸缩驱动器且对应的参数基因处于激活状态。参数基因可以自由选择编码

方式,包括实数编码、二进制编码等.本文中参数基因采用二进制编码,表示与控制基因相对应的各 PLZT 光致伸缩驱动器上光强值的大小.递阶编码方式使染色体编码不仅包含了各 PLZT 光致伸缩驱动器输入光强的信息,也包括了 PLZT 光致伸缩驱动器位置、数量等拓扑信息,较传统遗传算法^[15]提供了更广阔的设计空间,可望改善结构形状控制的效果.此外,递阶遗传算法控制基因采用非“0”即“1”的二进制编码方式,这恰好符合结构拓扑优化的特性,从而更适用于拓扑优化问题的解决.

3 非接触形状控制

本文采用结构拓扑优化与递阶遗传算法结合构建 PLZT 光致伸缩层合梁结构非接触形状控制的控制系统,以 PLZT 光致伸缩驱动器的拓扑分布和照射到上面的光强值为设计变量

$$I_1 = \{0, 1, 0, 0, \dots, 1, 0\} \quad (7)$$

$$I_2 = \{i_1, i_2, i_3, \dots, i_n\} \quad (8)$$

其中 I_1 是由“0”和“1”组成的一维数组,表示对应位置处是否存在 PLZT 光致伸缩驱动器; I_2 是由二进制编码表示的字符串,分别表示每一片 PLZT 光致伸缩驱动器的入射光的光强值; n 为 PLZT 光致伸缩驱动器的最大个数;第 j 片 PLZT 光致伸缩驱动器的入射光的光强值 i_j 满足如下的约束条件: $i_{j,\min} \leq i_j \leq i_{j,\max} (j=1, 2, \dots, n)$,其中 $i_{j,\min}, i_{j,\max}$ 分别为第 j 片 PLZT 光致伸缩驱动器入射光光强取值范围的上下限.

以期望形状与控制形状差值的绝对值的相反数为递阶遗传算法的适应度函数

$$F = - \sum |w_d(i) - w_c(i)| \quad (9)$$

其中 $w_d(i)$ 为目标节点的期望位移; $w_c(i)$ 为目标节点的控制位移.

基于结构拓扑优化与递阶遗传算法的非接触形状控制的仿真流程如图 1 所示,其具体步骤如下:

1) 输入递阶遗传算法的控制参数,包括种群大小、个体包含的参数数量、交叉概率、变异概率、终止进化代数等.

2) 输入目标节点的期望位移.

3) 初始化控制基因和参数基因,由计算机程序随机生成遗传算法的初始种群.其中控制基因的个数设置为结构所需要的 PLZT 光致伸缩驱动器的最大个数;参数基因的程度取决于编码精度和设计变量的取值上下限.本文中光强值的精度 δ 取为小数点后一位,根据编码原则 $(i_{j,\max} - i_{j,\min}) / (2^l - 1) \leq \delta$ 可以确定第 j 片 PLZT 光致伸

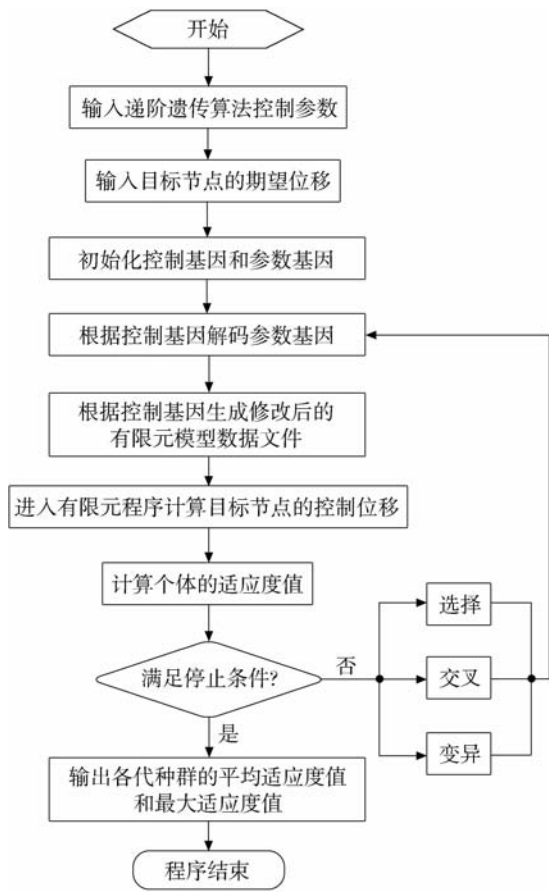


图 1 基于递阶遗传算法的非接触形状控制流程图
Fig. 1 Flow chart of non-contact shape control based on hierarchical genetic algorithms

缩驱动器的光强值编码成的二进制串的长度 l_j ,则个体的参数基因的长度为 n 个二进制串长度之和.

4) 根据控制基因解码参数基因,若某一位上控制基因为 0,则对应的参数基因不参与解码;反之则参与解码.最终根据控制基因解码出若干个实数光强值.

5) 生成修改后的有限元模型的数据文件,根据控制基因修改 PLZT 光致伸缩层合悬臂梁的有限元网格,若某一位上控制基因为 0,则删除基结构对应位置上的光电单元;反之则保留.计算修改后的有限元模型的单元节点编号和节点坐标,最终生成新的数据文件.

6) 求解目标节点的控制位移,将 4) 步中解码出的光强值和 5) 步中生成的数据文件代入有限元程序,求解目标节点的实际位移.

7) 计算出个体的适应度值.

8) 判断收敛,判断是否满足停止条件,若满足,则停止递阶遗传运算并转至 13) 步;否则,继续进行递阶遗传运算.

9) 选择操作,把当前群体按照锦标赛选择策

略遗传到下一代群体中。

10) 交叉操作,根据交叉概率,按照一致交叉策略相互交换某两个个体的部分染色体。

11) 变异操作,以变异概率替换个体染色体各个基因座上的原有基因值。

12) 生成新一代种群,将经过选择、交叉、变异操作后的新个体写入到新一代种群中,保留上一代种群中适应度最优的个体,返回步骤 4),继续进行递阶遗传运算。

13) 输出结果,输出各代种群的平均适应度值和最优适应度值,绘制期望形状与控制形状的对比图和适应度函数最优值进化曲线。

基于传统遗传算法的非接触形状控制方法^[15]仅能优化预先指定位置、数量的 PLZT 光致伸缩驱动器上的光强值,在控制过程中层合结构的有限元模型保持不变。本文的形状控制方法不仅能优化 PLZT 光致伸缩驱动器上的光强分布,还能优化光致伸缩驱动器的位置、数量,因此本文方法能够得到更科学、合理、经济的 PLZT 光致伸缩驱动器布置方案。

4 仿真算例

为了验证本文非接触形状控制方法的有效性和优越性,现结合以下两个光致伸缩层合悬臂梁的算例进行仿真计算,并与基于传统遗传算法的形状控制方法得到的结果进行对比。

4.1 光致伸缩层合悬臂梁单调函数期望形状控制

本文首先考虑一单调期望形状函数的控制问题,如图 2 所示悬臂梁,初始情况下悬臂梁上表面粘贴一层 PLZT 光致伸缩驱动器。悬臂梁几何尺寸:长 $L=110\text{ mm}$,宽 $b=5\text{ mm}$,厚 $h=0.8\text{ mm}$;材料参数:弹性模量 $E=70\text{ GPa}$,密度 $\rho=2.71\times 10^3\text{ kg/m}^3$,泊松比 $\mu=0.3$ 。进行有限元计算时,悬臂梁被均匀地离散为 22 个 8 节点固体壳单元,每片 PLZT 光致伸缩驱动器单独采用一个光电 8 节点固体壳单元。

PLZT 光致伸缩驱动器几何尺寸:长 $L_a=5$

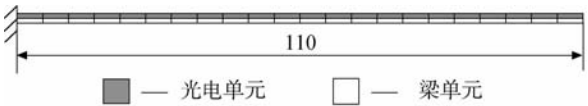


图 2 悬臂梁层合 PLZT 光致伸缩驱动器的基结构 (单位:mm)

Fig. 2 Base structure of a cantilever beam laminated PLZT photostrictive actuators (unit:mm)

mm,宽 $b_a=5\text{ mm}$,厚 $h_a=1\text{ mm}$;材料特性: $E_s=2.43\times 10^5\text{ V/m}$,弹性模量 $E_a=6.8\times 10^{10}\text{ Pa}$, $\alpha=2.772\times 10^{-3}\text{ m}^2/(\text{W}\cdot\text{s})$, $\beta=0.01\text{ V/s}$, $P=0.23\times 10^3\text{ cm}^2/\text{s}$,压电应变常数 $d_{33}=1.79\times 10^{-10}\text{ m/V}$, $H=16\text{ W/}^\circ\text{C}$, $\gamma=0.915\text{ W/}(\text{}^\circ\text{C}\cdot\text{s})$, $P_n=0.25\times 10^{-4}\text{ C/}(\text{m}^2\cdot\text{}^\circ\text{C})$, $\epsilon=1.65\times 10^{-8}\text{ F/m}$ 。作为对比,基于传统遗传算法的形状控制方法采用与图 2 相同的有限元模型,传统遗传算法的控制参数也与本文方法保持一致。

悬臂梁横向期望位移 $w_d(x)$ 为

$$w_d(x) = A_d \left[\cos\left(\frac{\pi x}{3L}\right) - 1 \right]$$

其中系数 $A_d=4.0\times 10^{-4}\text{ m}$; $0\leq x'\leq L$, x 为悬臂梁轴向坐标。

本文分别采用传统遗传算法与递阶遗传算法对该悬臂梁的形状最优控制问题进行了优化设计,两种形状控制方法得到的控制形状与期望形状的对比如图 3 所示。由图 3 可以看出,与基于传统遗传算法的形状控制方法相比,应用本文提出的基于结构拓扑优化与递阶遗传算法的形状控制方法能够更好地使得控制形状匹配于期望形状,与传统遗传算法相比,其控制误差降低了 90%。

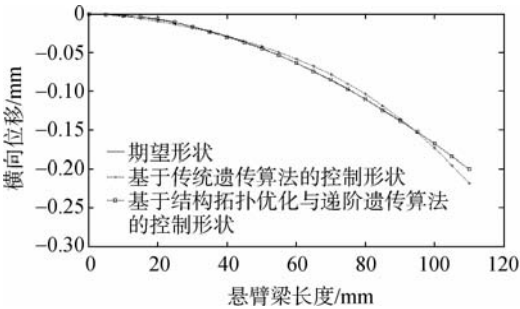


图 3 悬臂梁单调期望形状与控制形状对比图
Fig. 3 Comparison diagram of monotonous desired shape and achieved shapes of cantilever beam

两种方法得到的光强优化分布如表 1 所示,传统遗传算法结果中 22 个 PLZT 光致伸缩驱动器均有光强输入,但多个 PLZT 光致伸缩驱动器的光强很小,甚至趋向于零;而递阶遗传算法删除了 13 个 PLZT 光致伸缩驱动器,保留的 9 个光致伸缩驱动器的光强均较大,方案更合理。

两种控制方法的适应度函数最优值随遗传代数进化曲线如图 4 所示,计算结果显示,由于传统遗传算法仅能对预先设定布置方案的 PLZT 光致伸缩驱动器输入光强进行优化,而递阶遗传算法除了对光强进行优化外,还可以对 PLZT 光致伸缩驱动器的拓扑进行优化,获得了更大的优化

空间,因此递阶遗传算法的适应度进化速度明显优于传统遗传算法,与传统遗传算法相比,速度提高了 177%.

表 1 两种方法得到的各片 PLZT 光致伸缩驱动器的光强值

Table 1 Light intensity of each PLZT photostrictive actuator of two methods		
光致伸缩驱动器编号	光强/(W/m ²)	
	本文算法	传统遗传算法
1	191.1	81.2
2	0	33.1
3	0	0.6
4	274.9	3.9
5	460.4	2.9
6	317.1	1.0
7	0	1.7
8	0	7.3
9	0	0.2
10	444.7	40.6
11	0	0.8
12	372.9	304.0
13	0	0.8
14	0	403.4
15	212.7	41.3
16	73.2	80.6
17	0	27.7
18	0	418.4
19	0	363.2
20	81.1	203.7
21	0	293.7
22	0	121.3

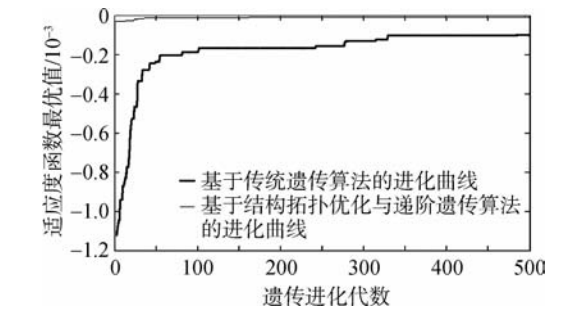


图 4 单调期望形状控制的适应度函数最优值进化曲线

Fig. 4 Optimal value's evolutionary curve of fitness function in monotonous desired shape control

4.2 光致伸缩层合悬臂梁非单调函数期望形状控制

本算例选用的非单调期望形状函数为

$$w_d(x) = A_d \left[\cos\left(\frac{3\pi x}{5L}\right) - 1 \right] \sin\left(\frac{5\pi x}{4L}\right)$$

其中 $A_d = 3.0 \times 10^{-5} \text{ m}$, $0 \leq x \leq L$.

本算例中初始情况下悬臂梁上、下表面各粘贴一层 PLZT 光致伸缩驱动器,悬臂梁与 PLZT 光致伸缩驱动器的几何尺寸和材料特性与 4.1 节中算例完全相同,基体结构还是划分为 22 个 8 节点固体壳单元,两层光元,两层 PLZT 光致伸缩驱动器则离散为 22×2 个光电 8 节点固体壳单元.

基于结构拓扑优化与递阶遗传算法的形状控制方法,最终拓扑优化得到的 PLZT 光致伸缩驱动器布置方案如图 5 所示. 基于传统遗传算法和基于结构拓扑优先与递阶遗传算法的两种形状控制方法得到的控制形状与期望形状的对比情况、最佳适应度的进化曲线分别如图 6~图 7 所示,不难看出递阶遗传算法在控制形状与期望形状的匹配、最佳适应度的进化速度等方面均优于传统遗传算法,其中进化速度提高了 91%,控制误差降低了 76%.

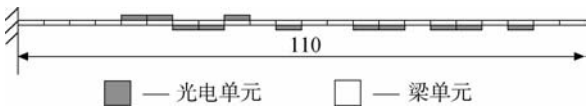


图 5 基于递阶遗传算法的形状控制方法拓扑优化的结果(单位:mm)

Fig. 5 Topological optimization results of shape control based on hierarchical genetic algorithms (unit:mm)

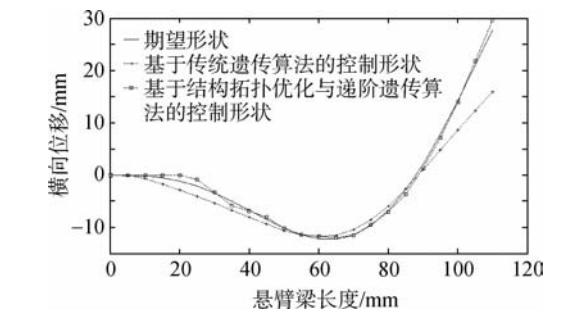


图 6 悬臂梁非单调期望形状与控制形状对比图

Fig. 6 Comparison diagram of non-monotonous desired shape and achieved shape of cantilever beam

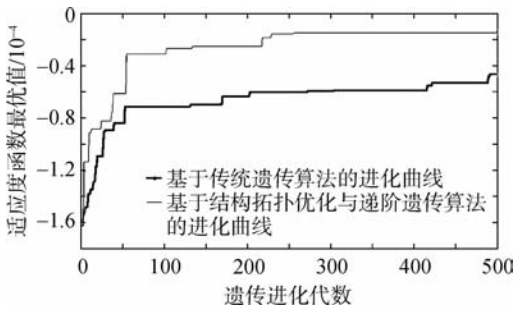


图 7 非单调期望形状控制的适应度函数最优值进化曲线
Fig. 7 Optimal value's evolutionary curve of fitness function in non-monotonous desired shape control

5 结 论

基于 PLZT 光致伸缩驱动器在强光照射下的光致伸缩效应,本文提出了一种结合结构拓扑优化、递阶遗传算法与有限元法的非接触形状控制方法.递阶遗传算法的递阶编码方式改进了染色体结构编码仿生的简陋性,使个体染色体携带了尽可能多的信息;结构拓扑优化使层合结构具有了更多的设计自由度,获得了更大的优化空间.基于结构拓扑优化与递阶遗传算法的非接触形状控制方法不仅得到了最优的光强分布,还优化了 PLZT 光致伸缩驱动器的位置和数量.仿真算例表明基于递阶遗传算法的结构形状非接触主动控制方法在控制精度、适应度的进化速度等方面均优于传统的遗传算法.

参考文献:

[1] Agawal B N,Treanor K E. Shape control of a beam using piezoelectric actuators[J]. Smart Materials and Structures,1999,8(6):729-739.

[2] Agrawal S K, Tong D, Nagaraja K. Modeling and shape control of piezoelectric actuator embedded elastic plates[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures,1994,5(4):514-521.

[3] Lin J C,Nien M H. Adaptive modeling and shape control of laminated plates using piezoelectric actuators[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 189 (1/2/3):231-236.

[4] Dawood M S, Iannucci L, Greenhalgh E S. Three-dimensional static shape control analysis of composite plates using distributed piezoelectric actuators[J]. Smart Materials and Structures,2008,17(2):025002. 1-025002-10.

[5] Luo Q T,Tong L Y. High precision shape control of plates using orthotropic piezoelectric actuators[J]. Finite Elements in Analysis and Design,2006,42(11):1009-1020.

[6] Kang Z,Tong L. Topology optimization-based distribution

design of actuation voltage in static shape control of plates[J]. Computers and Structures,2008,86(19):1885-1893.

[7] Liu S, Lin Z. Integrated design optimization of voltage channel distribution and control voltages for tracking the dynamic shapes of smart plates[J]. Smart Materials and Structures,2010,19(12):125013. 1-125013. 8.

[8] Kang Z,Wang X. Topology optimization of bending actuators with multilayer piezoelectric material[J]. Smart Materials and Structures,2010,19(7):075018. 1-075018. 11.

[9] Wang X J,Yue H H,Jiang J. Wireless active vibration control of thin cylindrical shells laminated with photostrictive actuators[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures,2011,22(4):337-351.

[10] Liu S T, Tong L Y, Lin Z. Simultaneous optimization of control parameters and configurations of PZT actuators for morphing structural shapes[J]. Finite Elements in Analysis and Design,2008,44(6/7):417-424.

[11] Shih H R,Watkins J, Tzou H S. Displacement control of a beam using photostrictive optical actuators[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures,2005,16(4):355-363.

[12] Rahman M,Nawaz M. Finite element modeling analysis of photostrictively driven optical actuators for excitation of microdevices[J]. Smart Materials and Structures,2011,20(11):115013. 1-115013. 12.

[13] Sun D,Tong L. Modeling of wireless remote shape control for beams using nonlinear photostrictive actuators[J]. International Journal of Solids and Structures,2007,44(2):672-684.

[14] Luo Z,Luo Q T, Tong L Y, et al. Shape morphing of laminated composite structures with photostrictive actuators via topology optimization[J]. Composite Structures,2011,93(2):406-418.

[15] 李书阳,郑世杰,王宏涛. PLZT 光致伸缩层合梁的非接触形状控制[J]. 宇航学报,2012,33(4):514-519.

LI Shuyang,ZHENG Shijie,WANG Hongtao. Non-contact shape control of the laminated beam based on PLZT photostrictive actuator[J]. Journal of Astronautics,2012,33(4):514-519. (in Chinese)

[16] Zheng S. Finite element simulation of wireless structural vibration control with photostrictive actuators[J]. Science China: Technological Sciences,2011,55(3):709-716.

[17] Shih H R,Tzou H S,Saypuri M. Structural vibration control using spatially configured opto-electromechanical actuators[J]. Journal of Sound and Vibration,2005,284(1/2):361-378.

[18] 范德礼,郑世杰,王宏涛. 基于递阶遗传算法的结构多损伤监测[J]. 航空动力学报,2013,28(9):2050-2054.

FAN Deli,ZHENG Shijie,WANG Hongtao. Multiple damages detection of structure based on hierarchical genetic algorithm[J]. Journal of Aerospace Power,2013,28(9):2050-2054. (in Chinese)