

振动主动控制模型及作动器位置优化仿真

梁旋 张方

(南京航空航天大学机械结构力学及控制国家重点实验室 南京 210016)

摘要:研究区域所有部位振动响应与振动控制检测部位的映射函数,优化传感器/作动器配置,建立合理的区域振动主动控制模型。连续体的振动主动控制中,往往用有限维的控制器去控制无限维的分布参数系统,实际工程中存在许多问题。本文应用 MATLAB 仿真,基于一维简单悬臂梁,等距离选取一定节点,识别外激励载荷;根据选取点传感器响应,对所有部位振动响应进行正交多项式拟合,代入振动主动控制的动力学模型,求解多项式系数;由振动响应确定优化目标函数,应用粒子群优化算法,研究在检测部位传感器位置不变、外激励特性改变的情况下控制作动器的最优位置。

关键词:悬臂梁;响应映射函数;作动器位置优化;MATLAB 仿真

中图分类号: TN911.72 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Optimization and simulation of active vibration control model and position of actuator

Liang Xuan Zhang Fang

(Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Establishment of reasonable regional active vibration control model is studied in this paper, and it focuses on the mapping function of regional vibration responses to observing parts in vibration control, and optimizes the sensor/actuator configuration. Active vibration control in no individual body often uses the finite dimensional controller to control the infinite dimensional distributed parameter systems, but it leads to many problems in practical engineering. MATLAB simulation is applied in this article, based on the one-dimensional simple cantilever beam, it selects certain nodes by equidistance, to identify the external load. According to the sensor responses of selected points, vibration response for all positions are orthogonal polynomial fitting, and the polynomial coefficients are solved in the dynamic model of active vibration control; with the optimal objective function determined by the vibration response and the application of particle swarm optimization algorithm, the research on the optimal locations of control actuators under the same sensor locations in testing position and the different characteristics of external excitation is surveyed.

Keywords: cantilever; the mapping function of responses; the optimal location of actuators; MATLAB simulation

1 引言

振动主动控制因其效果好、适应性强等潜在的优越性成为振动工程的研究热点,并在机械工程、土木建筑、车辆工程及航空航天等领域得到了极大应用。而目前振动主动控制研究集中内容体现在传感器、作动器、动力学建模^[1]及其振动控制^[2-3]、传感器/作动器的优化配置^[4]等方面。

实际振动系统的惯性、弹性和阻尼都是连续分布的,因而称为连续系统或分布参数系统。

振动主动控制中,控制器通常是有限维的,一般会用模态截断法去描述柔性结构,观察溢出与控制溢出等问题随之产生。实际中测试系统存在误差^[5],往往使用较大数目的传感器来提高控制效果,会导致工程所耗费成本的增加,并加剧对主结构产生的影响。

为得到区域振动主动控制模型,需进一步考虑区域主动控制模型与控制区域振动响应的映射关系:建立区域所有部位振动响应与振动控制检测部位的映射函数;给出区域振动控制效果的控制准则,精确描述区域振动的量化结果;解决不同振动类型控制模型映射传递过程的主要动力

学问题。

本文应用 MATLAB,对一维 Bernouli-Euler 悬臂梁进行仿真研究。先等距离选取一定节点,建立悬臂梁的动力学模型;通过动载荷频域识别技术,识别出外激励载荷;在振动主动控制的动力学模型中,根据有限点传感器响应,对所有部位振动响应进行正交多项式拟合,求解多项式系数;由所有部位振动响应确定优化目标函数,然后应用粒子群优化算法,研究在检测部位传感器位置不变、外激励特性改变的情况下控制作动器的最优位置,作动器位置优化原理如图 1 所示。

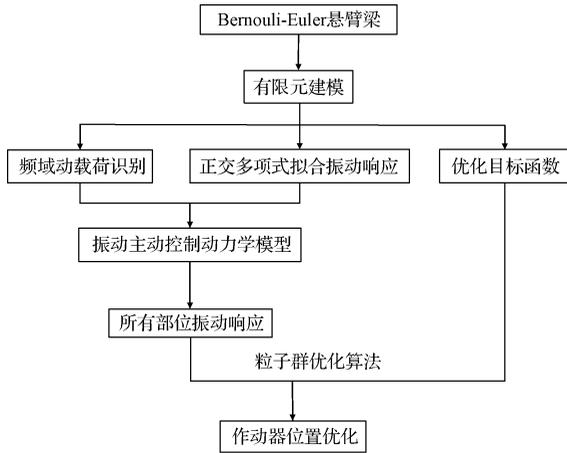


图 1 作动器位置优化原理

2 振动主动控制模型

2.1 悬臂梁

Bernouli-Euler 悬臂梁节点,如图 2 所示。

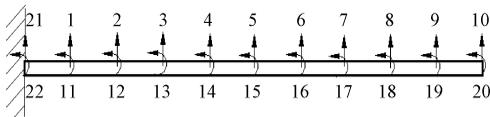


图 2 Bernouli-Euler 悬臂梁节点示意

1~10 为竖直方向自由度,11~20 为绕水平轴转动自由度,21,22 自由度为 0。

本文外激励在竖直方向施加,11~20 自由度无外加力。

对悬臂梁结构进行有限元划分,建立振动主动控制的动力学模型:

$$\mathbf{M}_{n \times n} \ddot{\mathbf{x}}_{n \times 1} + \mathbf{C}_{n \times n} \dot{\mathbf{x}}_{n \times 1} + \mathbf{K}_{n \times n} \mathbf{x}_{n \times 1} = \mathbf{F}_{n \times 1} + \mathbf{L}_{n \times r} \mathbf{u}_{r \times 1} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$ 为广义坐标,包括节点的 x 向位移、绕 z 轴的转角; n 为结构的自由度, $n = 10$; $\mathbf{M} \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 为结构的总体质量阵, $\mathbf{K} \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 为结构的刚度阵, $\mathbf{C} \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 为结构的阻尼阵; $\mathbf{F}_{n \times 1} \in \mathbf{R}^{n \times r}$ 为外激励向量矩阵, $\mathbf{L} \in \mathbf{R}^{n \times r}$ 为控制力向量的配置矩阵, $\mathbf{u} \in \mathbf{R}^{r \times 1}$ 为控制力的阵列, r 为作动器的配置数量。

基于系统减振效果最佳和输入控制力最小原则,优化

的目标函数:

等效能效比:

$$J =$$

$$\frac{\int_0^T \int_0^\infty (\mathbf{x}_{n \times 1}^T \mathbf{Q}_1 \mathbf{x}_{n \times 1}) dx dt - \int_0^T \int_0^\infty (\mathbf{x}_{n \times 1}^2 \mathbf{Q}_2 \mathbf{x}_{n \times 1}^2) dx dt}{\int_0^T \int_0^r (\mathbf{u}_{n \times 1} \mathbf{Q}_2 \mathbf{u}_{n \times 1}) dx dt} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{x}_{n \times 1}^1$ 为外激励引起的振动响应, $\mathbf{x}_{n \times 1}^2$ 为加入控制力后的振动响应,权系数取单位矩阵 $\mathbf{Q}_1 = \mathbf{Q}_2 = \mathbf{I}$ 。 J 的最大值 J_{\max} 即为优化目标值。

2.2 载荷识别

工程结构动载荷识别技术有一定的发展,而梁结构的动载荷识别日趋完善^[6],相关载荷谱测试及分析也有所研究^[7]。

动载荷识别可以从频域和时域出发,本文从频域分析,考虑多输入多输出的情况,系统的关系式可写为式(3):

$$\begin{bmatrix} H_{11}^r & -H_{11}^i & \cdots & \cdots & H_{1n_f}^r & -H_{1n_f}^i \\ H_{11}^i & -H_{11}^r & \cdots & \cdots & H_{1n_f}^i & -H_{1n_f}^r \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ H_{n_n 1}^r & -H_{n_n 1}^i & \cdots & \cdots & H_{n_n n_f}^r & -H_{n_n n_f}^i \\ H_{n_n 1}^i & -H_{n_n 1}^r & \cdots & \cdots & H_{n_n n_f}^i & -H_{n_n n_f}^r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_1^r \\ F_1^i \\ \vdots \\ \vdots \\ F_{n_f}^r \\ F_{n_f}^i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U^r \\ U^i \\ \vdots \\ \vdots \\ U_{n_n}^r \\ U_{n_n}^i \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: H_{nm}^r, H_{nm}^i 为第 n 个激励点与第 m 个响应点之间的频响函数的实部和虚部。 F_n^r, F_n^i 为复数形式的第 n 个激励力的实部与虚部, U_m^r, U_m^i 为第 m 个位移响应的实部与虚部。 n_f 为激励力的数目, n_n 为测量的动响应的位置数目:

- 当 $n_f > n_n$ 时,不能识别出未知的动载荷;
- 当 $n_f = n_n$ 时,左端的传递矩阵为方阵,可直接求逆;
- 当 $n_f < n_n$ 时,求传递矩阵的最小二乘广义逆。

对多输入多输出系统来说,识别模型是单输入情况的简单扩充,但是多输入多输出的动载荷识别模型必须满足矩阵论的求逆理论,识别模型方能有解,即系统的输出数目要不小于输入数目时,才能根据识别模型识别多个位置的动载荷。

本文外激励为有限点载荷时,取 $n_f = 3, n_n = 10$,可以同时确定载荷的位置信息;外激励为分布载荷时,取 $n_f = 10, n_n = 10$ 。

2.3 正交多项式拟合

正交多项式是一种特殊的函数,由于它的正交性和收敛性,使它在数学物理方程、特殊函数、数值分析等一些经典的数学分支中有着重要的地位。

正交多项式本身有很多形式,本文用第一类切比雪夫多项式^[8]进行拟合。

第一类切比雪夫多项式:

$$\begin{aligned} P_{i+1}(\beta) &= 2\beta \cdot P_i(\beta) - P_{i-1}(\beta) \\ P_1(\beta) &= 1, P_2(\beta) = \beta \end{aligned} \quad (4)$$

选取基函数 $\varphi_i(\beta) = P_i(\beta)$, 空间点 β 上的响应 $x =$

$$f(\beta) = \sum_{i=1}^l a_i P_i(\beta) = P_{l \times 1} \cdot a_{l \times 1}, \quad l \text{ 为正交多项式项数。}$$

控制区域所有部位振动响应 $x = P_{n \times l} \cdot a_{l \times 1}$, 其中:

$$P_{n \times l} = \begin{bmatrix} P_1(\beta_1) & P_2(\beta_1) & \cdots & P_l(\beta_1) \\ P_1(\beta_2) & P_2(\beta_2) & \cdots & P_l(\beta_2) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_1(\beta_n) & P_2(\beta_n) & \cdots & P_l(\beta_n) \end{bmatrix} \quad (5)$$

m 个监测点的响应 $x = (x_1, x_2, x_3 \cdots x_m)$, $m \geq l$, 取 $m = l$, 即正交多项式项数与监测点数目一致。

$[x_1, x_2, x_3 \cdots x_m]^T = P_{m \times l} \cdot [a_1, a_2, a_3 \cdots a_l]^T$, 代入振动主动控制动力学模型式(1), 求解得到正交多项式, 确定所有部位振动响应。

2.4 粒子群算法

粒子群优化(PSO)算法是近年发展起来的一种新的进化算法^[9-13]。粒子群算法: 确定粒子群的规模, 初始化蚁群粒子(初始化粒子位置和速度), 然后通过迭代寻找最优解, 在每次迭代中, 粒子群通过跟踪两个极值来更新自己。

$$\begin{aligned} v_{i,d}(t+1) &= \omega \cdot v_{i,d}(t) + c_1 r_1 [p_{i,d}(t) - x_{i,d}(t)] + \\ & c_2 r_2 [p_{g,d}(t) - x_{i,d}(t)] \\ x_{i,d}(t+1) &= x_{i,d}(t) + v_{i,d}(t+1) \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $x_{i,d}(t)$ 为当前位置, $v_{i,d}(t)$ 为当前迭代速度; $x_{i,d}(t+1)$ 为下一次迭代得到的位置, $v_{i,d}(t+1)$ 为新的迭代速度; $p_{i,d}(t)$ 为个体极值, $p_{g,d}(t)$ 为全局极值; ω 为惯性权重, 决定了对当前粒子速度继承多少, 合适的选择可以使粒子具有均衡的探索能力和开发能力; c_1, c_2 为加速因子, 可以加快收敛且不陷入局部最优; r_1, r_2 为 $0 \sim 1$ 的随机数。

MATLAB 粒子群工具箱(PSOt)可约定惯性因子的起始值和终止值、各维变量的取值范围、粒子遇到边界时是否反弹等参数。粒子群算法流程如图3所示。

PSOt 灵活性非常强, 只要根据要求确定目标函数(优化目标函数: 等效能效比), 指定自变量的取值范围和每次迭代所允许的最大范围, 即可自行计算。

本文 MATLAB 程序参数设置如下:

$$\begin{aligned} [Bbest, tr, te] &= pos_Trelea_vectorized \\ (funcname, D, mv, VarRange, minmax, \end{aligned}$$

PSOparams)

$$funcname = @Fitness_round$$

$$D = nl; \%nl \text{ 为总自由度}$$

$$mv = 0.2 \cdot (VarRange(:, 2) - VarRange(:, 1)); \% \text{ 最大速度取范围的 } 10\% \sim 20\%$$

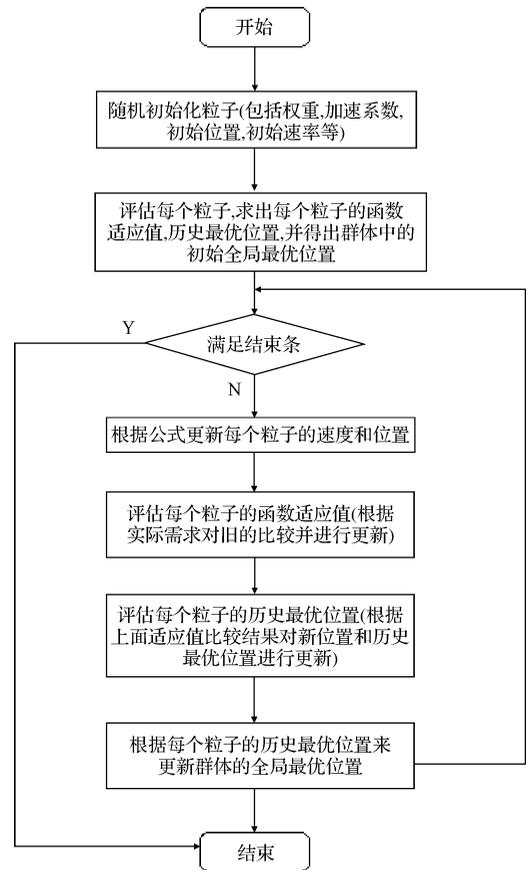


图3 粒子群算法流程

VarRange 随控制点数目改变而变化

minmax=1%等效能效比最大

PSOparams=

[0 10~100 10 2 2 0.9 0.4 1500 1e-25 150 NaN 0 0]

3 作动器位置优化仿真

本文研究两种不同载荷: 一种是外激励为有限点载荷, 另一种是外激励为分布载荷。方向竖直向下。

有限点载荷: 3 个外载荷, 施加点为 2、4、8, 参考幅值为 1; 分布载荷: 载荷等效施加点 1~10, 参考幅值为 1。

分别研究控制点数目为 1, 2, 3, 4 的情况, 监测点数目与控制点数目保持一致。其中, 监测点位置随控制点数目变化情况:

- 1 点控制: 监测点 2;
- 2 点控制: 监测点 2, 8;
- 3 点控制: 监测点 2, 5, 8;
- 4 点控制: 监测点 2, 4, 6, 8。

每组保持监测点位置不变, 改变外激励特性(幅值大小、激振频率和相位差), 分析作动器最优位置的相应变化。其中, 外激励特性变化情况:

- 1) 有限点载荷:

幅值变化: 0 : 0.25 : 10, 分为点 2 幅值变化、点 4 幅值变化、点 8 幅值变化 3 种情况;

频率变化:0 : 0.5 : 200(Hz),悬臂梁的固有频率为:
一阶 25 Hz,二阶 157 Hz;

相位变化: -360° : 15° : 360°,分为点 2 相位变化、点
4 相位变化、点 8 相位变化 3 种情况。

2)分布载荷:

幅值变化:情况 1  情况 2  情况 3 
情况 4 ,幅值为 1;

频率变化:0 : 0.5 : 200(Hz);

相位变化:情况 1  情况 2  情况 3 
情况 4 ,幅值为 360°。

4 仿真结果

4.1 有限点载荷(2,4,8)

有限点载荷仿真数据如表 1~9 所示。

表 1 点 2、4、8 幅值分别变化下 1 点控制的作动器优化位置

幅值放大 倍数	点 2		点 4		点 8	
	作动器 最优位置	等效能效比 (10 ⁻¹⁶)	作动器 最优位置	等效能效比 (10 ⁻¹⁶)	作动器 最优位置	等效能效比 (10 ⁻¹⁶)
0	1	0.14	2	0.35	10	1.04
0.25	2	0.17	10	0.69	10	1.21
0.5	2	0.23	10	1.04	10	1.39
0.75	2	0.29	10	1.39	10	1.56
1	4	0.35	10	1.73	10	1.73
2	10	0.58	10	3.12	10	2.43
3	10	0.81	10	4.51	10	3.12
4	10	1.04	10	5.90	10	3.82
5	10	1.27	10	7.28	10	4.51
6	10	1.50	10	8.67	10	5.20
7	10	1.73	10	10.06	10	5.90
8	10	1.96	10	11.45	10	6.59
9	10	2.20	10	12.83	10	7.29
10	10	2.43	10	14.22	10	7.98

表 2 点 2、4、8 幅值分别变化下 2 点控制的作动器优化位置

幅值放大 倍数	点 2		点 4		点 8				
	作动器 最优位置	等效能效比 (10 ⁻¹⁶)	作动器 最优位置	等效能效比 (10 ⁻¹⁶)	作动器 最优位置	等效能效比 (10 ⁻¹⁶)			
0	3	5	2.77	10	6	2.51	1	5	0.89
0.25	4	5	3.12	10	6	0.82	1	5	1.61
0.5	4	5	3.47	1	5	1.51	2	5	2.39
0.75	4	5	3.82	2	5	2.74	3	5	3.23
1	6	5	4.17	6	5	4.17	6	5	4.17
2	7	5	5.70	10	5	11.37	10	5	8.71
3	10	5	7.31	10	5	18.64	10	5	13.30
4	10	5	8.94	10	5	25.89	10	5	17.88
5	10	5	10.56	10	5	33.14	10	5	22.44
6	10	5	12.19	10	5	40.39	10	5	27.00
7	10	5	13.82	10	5	47.63	10	5	31.56
8	10	5	15.44	10	5	54.88	10	5	36.11
9	10	5	17.07	10	5	62.17	10	5	40.67
10	10	5	18.70	10	5	69.37	10	5	45.22

表3 点2、4、8幅值分别变化下3点控制的作动器优化位置

幅值 放大倍数	点2				点4				点8			
	作动器 最优位置			等效能效比 (10^{-16})	作动器 最优位置			等效能效比 (10^{-16})	作动器 最优位置			等效能效比 (10^{-16})
0	10	9	6	3.04	9	10	6	11.16	9	10	6	6.10
0.25	9	10	6	2.52	10	9	6	8.13	10	9	6	4.80
0.5	1	2	6	1.59	9	10	6	5.29	10	9	6	3.55
0.75	9	10	6	1.23	10	9	6	3.17	10	9	6	2.30
1	1	2	6	2.22	2	1	6	2.22	1	2	6	2.22
2	1	2	6	3.46	4	2	6	8.35	1	3	6	5.68
3	1	2	6	4.69	5	7	6	16.65	3	4	6	9.96
4	1	2	6	5.93	9	10	6	26.14	7	5	6	15.20
5	3	2	6	7.43	9	10	6	35.71	10	9	6	20.94
6	3	2	6	8.94	9	10	6	45.26	9	10	6	26.78
7	2	4	6	10.51	10	9	6	54.80	9	10	6	32.60
8	3	4	6	12.17	10	9	6	64.34	9	10	6	38.41
9	5	4	6	13.93	9	10	6	73.87	9	10	6	44.22
10	4	5	6	15.78	9	10	6	83.40	9	10	6	50.02

表4 点2、4、8幅值分别变化下4点控制的作动器优化位置

幅值 放大倍数	点2				点4				点8						
	作动器 最优位置			等效能效比 (10^{-16})	作动器 最优位置			等效能效比 (10^{-16})	作动器 最优位置			等效能效比 (10^{-16})			
0	10	8	9	4	9.39	10	8	9	4	16.17	10	8	9	4	12.17
0.25	10	8	9	4	8.54	10	8	9	4	14.03	10	8	9	4	10.56
0.5	10	8	9	4	7.98	8	10	9	4	11.51	10	8	9	4	9.32
0.75	10	8	9	4	7.47	10	8	9	4	9.01	10	8	9	4	8.14
1	10	8	9	4	6.98	10	8	9	4	6.98	10	8	9	4	6.98
2	10	8	9	7	4.76	2	4	1	3	4.18	10	8	9	7	2.31
3	10	8	9	7	2.95	4	1	5	3	9.03	1	2	4	3	5.16
4	10	8	9	7	1.97	4	5	6	3	15.23	1	2	5	3	8.00
5	2	1	4	3	3.36	5	10	6	3	22.35	4	5	2	3	11.47
6	1	2	4	3	4.43	10	8	9	3	30.00	5	6	4	3	15.33
7	1	4	2	3	5.49	8	10	9	4	37.89	7	5	6	3	19.58
8	2	1	4	3	6.54	10	8	9	4	45.79	10	9	7	3	24.10
9	1	4	2	3	7.59	10	8	9	4	53.68	9	10	8	3	28.72
10	4	1	2	3	8.63	9	10	8	4	61.56	8	10	9	4	33.43

表5 外激励频率变化下的作动器优化位置

频率/Hz	1点控制		2点控制		3点控制		4点控制	
	最优位置	等效能效比 (10^{-16})	最优位置	等效能效比 (10^{-16})	最优位置	等效能效比 (10^{-16})	最优位置	等效能效比 (10^{-16})
0	10	1.739 46	4 5	4.164 04	2 1 6	2.192 32	10 8 9 4	7.127 17
10	10	1.739 49	4 5	4.164 16	2 1 6	2.192 43	10 8 9 4	7.127 01
20	10	1.739 58	4 5	4.164 51	1 2 6	2.192 79	8 10 9 4	7.126 53
23	10	1.739 61	4 5	4.164 67	1 2 6	2.192 94	9 10 8 4	7.126 32
24	10	1.739 63	4 5	4.164 72	2 1 6	2.192 99	10 8 9 4	7.126 25
25	10	1.739 64	4 5	4.164 78	9 10 6	0.666 68	9 10 8 4	7.126 17
26	10	1.739 65	4 5	4.164 84	1 2 6	2.193 11	10 9 8 4	7.126 09
27	10	1.739 67	4 5	4.164 90	2 1 6	2.193 17	10 8 9 4	7.126 00
30	10	1.739 72	4 5	4.165 11	2 1 6	2.193 37	9 8 10 4	7.125 73
50	10	1.740 16	4 5	4.167 01	10 9 6	0.664 46	9 8 10 4	7.123 16
100	10	1.742 25	4 5	4.175 96	2 1 6	2.204 02	8 10 9 4	7.111 12
150	10	1.745 75	4 5	4.190 91	2 1 6	2.218 70	8 10 9 4	7.090 97
155	10	1.746 18	4 5	4.192 74	10 9 6	6.394 97	8 10 9 4	7.088 51
156	10	1.746 26	4 5	4.193 11	1 2 6	2.220 86	10 9 8 4	7.088 01
157	10	1.746 35	4 5	4.193 49	1 2 6	2.221 23	9 8 10 4	7.087 50
158	10	1.746 44	4 5	4.193 87	2 1 6	2.221 60	10 9 8 4	7.086 99
159	10	1.746 53	4 5	4.194 25	1 2 6	2.221 98	8 10 9 4	7.086 48
180	10	1.748 53	4 5	4.202 80	1 2 6	2.230 36	10 9 8 4	7.074 95
200	10	1.750 67	6 5	4.212 38	2 1 6	2.239 34	9 8 10 4	7.062 61

表6 点2、4、8相位分别变化下1点控制的作动器优化位置

相位 变化度数	点2		点4		点8	
	作动器 最优位置	等效能效比 (10^{-16})	作动器 最优位置	等效能效比 (10^{-16})	作动器 最优位置	等效能效比 (10^{-16})
0	10	1.73	10	4.17	10	4.17
30	10	1.64	10	3.88	10	3.88
45	10	1.53	10	3.53	10	3.53
60	10	1.39	10	3.09	10	3.09
90	10	1.04	10	4.17	10	4.17
180	10	0.35	4	3.88	2	3.88
270	10	1.04	10	3.53	10	3.53
360	10	1.73	10	3.09	10	3.09

表7 点2、4、8相位分别变化下2点控制的作动器优化位置

相位变化度数	点2		点4		点8	
	作动器 最优位置	等效能效比 (10^{-16})	作动器 最优位置	等效能效比 (10^{-16})	作动器 最优位置	等效能效比 (10^{-16})
0	6 5	4.17	6 5	4.17	6 5	4.17
30	4 5	3.98	4 5	3.88	4 5	3.67
45	4 5	3.76	4 5	3.53	3 5	3.09
60	4 5	3.47	3 5	3.09	2 5	2.39
90	3 5	2.77	2 5	2.10	1 5	0.89
120	2 5	2.07	1 5	1.30	10 6	1.67
150	1 5	1.65	1 5	0.73	10 6	2.98
180	1 5	1.48	10 6	1.07	10 6	3.94
270	3 5	2.77	2 5	2.11	1 5	0.89
360	6 5	4.17	6 5	4.17	6 5	4.17

表8 点2、4、8相位分别变化下3点控制的作动器优化位置

相位 变化度数	点2				点4				点8			
	作动器 最优位置		等效能效比 (10^{-16})		作动器 最优位置		等效能效比 (10^{-16})		作动器 最优位置		等效能效比 (10^{-16})	
0	2	1	6	2.22	2	1	6	2.22	1	2	6	2.22
30	2	1	6	2.05	1	2	6	1.92	9	10	6	1.62
45	2	1	6	1.85	9	10	6	2.07	10	9	6	2.52
60	9	10	6	1.99	10	9	6	2.78	10	9	6	3.55
90	9	10	6	3.04	10	9	6	4.48	9	10	6	6.10
180	10	9	6	6.16	9	10	6	9.28	9	10	6	13.02
270	10	9	6	2.50	9	10	6	4.48	9	10	6	6.10
360	2	1	6	2.22	2	1	6	2.22	1	2	6	2.22

表9 点2、4、8相位分别变化下4点控制的作动器优化位置

相位 变化度数	点2				点4				点8						
	作动器 最优位置		等效能效比 (10^{-16})		作动器 最优位置		等效能效比 (10^{-16})		作动器 最优位置		等效能效比 (10^{-16})				
0	10	8	9	4	6.98	10	8	9	4	6.98	10	8	9	4	6.98
30	10	8	9	4	7.24	10	8	9	4	7.45	10	8	9	4	7.61
45	10	8	9	4	7.56	10	8	9	4	7.99	10	8	9	4	8.35
60	9	10	8	4	7.98	10	8	9	4	8.70	10	8	9	4	9.32
90	10	8	9	4	9.39	8	10	9	4	10.84	10	8	9	4	12.17
180	10	8	9	4	11.88	10	8	9	4	14.76	10	8	9	4	17.56
270	10	8	9	4	9.39	10	8	9	4	10.84	10	8	9	4	12.17
360	10	8	9	4	17.34	10	8	9	4	6.98	10	8	9	4	6.98

由表1~9得到有限点载荷作用下作动器的最优位置。由表1~4可得,3个外激励节点的幅值单独增大时,1、2点控制对应的作动器最优位置逐渐趋于稳定,而3、4点控制对应的作动器最优位置不断变化,但有较小的稳定趋势。由表5可得,外激励频率增大,1点、2点和4点控制对应的作动器最优位置基本没有变化,3点控制对应的作动器最优位置在共振频率带稍有变化。由表6~9可得,3个外激励节点的相位单独增大时,1点控制对应的作动器最优位置不断变化,2、3点控制对应的作动器最优位

置有规律变化,4点控制对应的作动器最优位置基本没有变化。

当外激励为有限点载荷时:外激励幅值变化会引起作动器最优位置的变化,但当幅值差异超过一定程度时,最优位置趋于稳定;激励频率的改变对作动器最优位置影响很小,共振频率附近稍有变化;作动器最优位置随外激励之间的相位差改变而有一定规律地变化。

4.2 分布载荷

分布载荷仿真数据如表10~12所示。

表10 不同幅值情况下的作动器优化位置

幅值 变化情况	1点控制		2点控制		3点控制		4点控制							
	最优 位置	等效能效比 (10^{-16})	最优 位置	等效能效比 (10^{-16})	最优 位置	等效能效比 (10^{-16})	最优位置		等效能效比 (10^{-16})					
1	10	3.925 4	10	5	14.759 0	10	9	6	12.458 0	4	1	2	3	6.757 7
2	10	0.627 2	10	5	4.074 2	10	9	6	14.066 3	8	9	10	4	18.825 1
3	10	0.733 6	1	5	1.590 6	9	10	6	6.552 4	10	8	9	4	13.099 3
4	10	0.677 4	10	5	7.906 6	9	10	6	17.661 3	8	10	9	4	21.417 0

表 11 不同频率情况下的作动器优化位置

频率 /Hz	1点控制		2点控制		3点控制		4点控制		
	最优 位置	等效能效比 (10^{-15})							
0	10	0.626 956	10	5	2.728 69	9 10 6	2.798 72	4 5 6 3	1.646 41
10	10	0.626 966	10	5	2.728 75	9 10 6	2.798 80	4 6 5 3	1.646 46
20	10	0.626 996	10	5	2.728 91	9 10 6	2.799 01	4 5 6 3	1.646 62
23	10	0.627 009	10	5	2.728 98	9 10 6	2.799 10	4 5 6 3	1.646 68
24	10	0.627 014	10	5	2.729 00	9 10 6	2.799 13	4 6 5 3	1.646 71
25	10	0.627 019	10	5	2.729 03	9 10 6	2.799 17	5 4 6 3	1.646 73
26	10	0.627 024	10	5	2.729 06	10 9 6	2.799 20	4 5 6 3	1.646 76
27	10	0.627 030	10	5	2.729 08	10 9 6	2.799 24	5 6 4 3	1.646 78
30	10	0.627 047	10	5	2.729 18	10 9 6	2.799 36	6 4 5 3	1.646 88
50	10	0.627 210	10	5	2.730 04	10 9 6	2.800 50	6 5 4 3	1.647 71
100	10	0.627 974	10	5	2.734 08	10 9 6	2.805 84	10 5 4 3	1.644 26
150	10	0.629 252	10	5	2.740 83	9 10 6	2.814 77	10 5 4 3	1.650 89
155	10	0.629 408	10	5	2.741 65	10 9 6	2.815 86	5 4 6 3	1.658 92
156	10	0.629 440	10	5	2.741 82	10 9 6	2.816 09	4 5 10 3	1.651 86
157	10	0.629 472	10	5	2.741 99	9 10 6	2.816 31	5 6 4 3	1.659 25
158	10	0.629 505	10	5	2.742 16	10 9 6	2.816 54	4 5 6 3	1.659 42
159	10	0.629 537	10	5	2.742 33	10 9 6	2.816 77	5 4 6 3	1.659 58
180	10	0.630 268	10	5	2.746 20	9 10 6	2.821 87	5 4 6 3	1.663 31
200	10	0.631 050	10	5	2.750 33	10 9 6	2.827 34	5 4 6 3	1.667 30

表 12 不同相位情况下的作动器优化位置

相位 变化情况	1点控制		2点控制		3点控制		4点控制		
	最优 位置	等效能效比 (10^{-1})	最优 位置	等效能效比 (10^{-16})	最优 位置	等效能效比 (10^{-16})	最优 位置	等效能效比 (10^{-16})	
1	10	1.307 22	6	5	3.941 44	1 2 6	2.553 50	10 8 9 4	6.146 50
2	10	1.617 09	7	5	4.912 42	1 2 6	2.796 96	10 8 9 4	6.768 97
3	10	1.055 56	4	5	3.386 44	9 10 6	2.867 93	10 8 9 4	9.511 77
4	10	0.991 85	6	5	3.473 12	2 1 6	1.991 12	10 8 9 4	8.144 79

由表 10~11 得到分布载荷作用下作动器的最优位置。由表 10 可得,不同正弦分布载荷下,1、3 点控制对应的作动器最优位置没有变化,2、4 点控制对应的作动器最优位置稍有变化。由表 11 可得,外激励频率增大,1、2、3 点控制作动器最优位置没有变化;4 点控制作动器最优位置稍有变化。由表 12 可得,不同相位差下,各点控制作动器最优位置基本没有变化。

当外激励为分布载荷时:外激励的幅值差异对作动器最优位置影响较小;激励频率的改变对作动器最优位置影响很小,共振频率附近稍有变化;分布载荷的相位差对作动器最优位置影响较小。

5 结 论

本文应用 MATLAB 仿真,基于一维简单悬臂梁,根据选取点传感器响应,对所有部位振动响应进行正交多项式拟合,建立区域所有部位振动响应与振动控制检测部位的映射函数,得到区域振动主动控制模型。运用粒子群优化算法,研究在检测部位传感器位置不变、外激励特性改变的情况下控制作动器的最优位置。

综合模型误差和优化算法的局限性,从研究结果可以看出,对于有限点外激励,激励幅值间的差异对作动器最优位置有一定影响,但当差异过大时,会得到一个稳定的

最优位置;共振和相位差会引起最优位置的变化。对于分布外激励,激励特性的改变对作动器最优位置影响很小。

同时,控制点相对于激励点越多,作动器最优位置越稳定。

相对于有限元建模,区域振动主动控制模型考虑了节点以外的振动响应,综合描述了结构所有部位振动响应,得到的作动器最优位置也更具全面性。

参 考 文 献

- [1] 王慧丽,杨海忠.基于系统辨识的车辆动力学建模方法[J].仪器仪表学报,2015,36(6):1275-1282.
- [2] 李全祥,殷海涛,姜金辉,等.复合材料悬臂梁的宽频带振动控制试验系统[J].国外电子测量技术,2012,31(2):61-65.
- [3] 鲁照权,孙木,周俊,等.基于电液比例的加热炉步进梁控制算法研究[J].电子测量技术,2014,37(8):60-64.
- [4] 曹玉岩,王志臣,付世欣,等.智能桁架结构最优振动控制与作动器优化配置[J].振动与冲击,2015(5):26-32.
- [5] JIANG D, LIU X K, WANG D Y, et al. Analysis of sensitivity and errors in Maglev vibration test system[J]. Instrumentation, 2016, 3(1): 70-78.
- [6] 张景,张方,姜金辉,等.梁结构上动载荷位置识别的快速算法[J].国外电子测量技术,2016,35(3):42-46.
- [7] 蔡建进,邵明亮.全承载大客车底架动态载荷谱分

析[C].全国高校机械工程测试技术研究会、中国振动工程学会动态测试专业委员会2012年代表大会暨学术年会论文集,2012:1-7.

- [8] 李目,谭文,何怡刚,等.控制 Logistic 系统的自适应 Chebyshev 多项式神经网络算法[J].电子测量与仪器学报,2010,24(8):730-736.
- [9] 刘燕,郭陈江,丁君,等.基于粒子群算法的阵列天线波束赋形[J].电子测量技术,2007,30(6):43-45.
- [10] 贾云涛,张建永,胡耀元,等.基于 PSO-NGM 模型的电子电路故障预测[J].电子测量技术,2015,38(10):118-121.
- [11] 吴华丽,吴进华,汪秀莉,等.基于动态改变惯性权值的粒子群算法[J].国外电子测量技术,2008,27(10):6-8.
- [12] 王荣芝,陈晓.基于 DPSO 算法的并行测试任务调度[J].中国测试,2014(3):101-104.
- [13] 王泰华,陈致富.基于 PSO 自整定 PID 的塔架式抽油机调速系统研究[J].电子测量与仪器学报,2014,28(9):998-1004.

作 者 简 介

梁旋,1992 年出生,男,硕士研究生,主要研究方向为振动主动控制等。

E-mail: 15895831712@163.com

张方,1962 年出生,男,教授,主要研究方向为复杂结构动载荷识别、噪声与振动控制、振动信号数据分析等。

E-mail: zhangf@nuaa.edu.cn