

桁架结构振动的主动模糊控制中主动杆数目与位置优化*

司洪伟 李东旭

(国防科技大学航天与材料工程学院,长沙 410073)

摘要 研究了采用自适应模糊控制器抑制桁架结构振动时的主动杆数目与位置优化问题.通过定义输入能量相关矩阵优化了主动杆的数目.基于主动杆的控制能量配置准则,给出了主动杆优化配置的模型.研究基于整数编码的遗传算法用于大型离散体中的作动器组合优化问题.最后针对挠性空间智能桁架结构的振动控制仿真,使用基于整数编码的遗传算法(GAs)优化主动杆位置.结果表明对于采用自适应模糊控制律的离散体结构振动控制是行之有效的.

关键词 智能桁架,模糊控制,振动控制,整数编码,主动杆

引言

大型桁架结构因具有集散简单、可靠性强、对任务的适应度大等特点而在航天结构中得到广泛的应用;但是作为一种极具代表性的大型离散含间隙结构^[1],其结构动力学特性很复杂,大型航天桁架结构的动力学特性主要表现为:多体、高维、非线性、时变、低频、密频以及小阻尼等特性^[2].主动构件(Active Members)是智能桁架结构的关键部位,本文中的主动杆是指用于结构振动精密控制,通常需要较小的作动位移、较大作动力的主动构件.主动杆的优化主要包含大小、数目、位置优化三个部分.大小的优化通常是根据所控制的对象,先期进行论证和制造;数目与位置优化是我们研究的主要问题.

编码就是将所要优化的参数按照一定的规则从参数空间映射为编码空间的一个“基因”.遗传算法的编码规则(1)应使用能易于产生与所求问题相关的且具有低阶、短定义长度模式的编码方案;(2)应使用能使问题得到自然表示或描述的具有最小编码字符集的编码方案.二进制编码的优点是编码、解码简单易行,交叉、变异也便于实现,但它也有一些缺陷,如存在连续函数离散化时的映射误差,个体编码串长度较短时,可能精度较低;而长度

较长时,又会使搜索空间急剧增大,运行效率低下.浮点数编码使用的是决策变量的真实值,所以也叫真值编码.目前,使用基于二进制和浮点数编码的遗传算法优化作动器的位置已经取得了很大的进展^[3,4],但是更进一步地说,对于离散体的组合优化问题,最直接的编码是基于整数的编码,能直接满足所求解问题的性质,如离散体的桁架结构的优化问题.作动器配置方法大致有:基于系统可控性/客观性的准则、基于系统能量准则、基于系统响应的配置准则、基于失效和可靠性准则、基于控制/观测溢出的配置准则以及其他性能的配置准则.文献[5,6]指出:对结构系统进行控制不仅与控制时作动器/传感器的数目、位置有关,而且与控制方法、增益等有关.在基于系统可控性/可观性的配置准则中,没有考虑后面因素的影响.采用基于系统能量的配置准则进行作动器/传感器的优化配置时,还可同时考虑控制方法和增益的影响.随着科学技术的发展,对结构的使用要求的提高,结构系统的一体化设计是重要的发展方向,考虑控制增益的作动器/传感器配置方法将得到进一步的发展.在实际控制中,控制律的设计确实是和配置、结构参数相互耦合在一起的.结构振动主动模糊控制已经取得了一定的进展^[7-10],但是,目前作动器优化只局限于线性反馈律,模糊控制本质上是一种非线性反

馈,目前没有研究适合于主动模糊控制的作动器优化配置方法.理论上,模糊控制在实际控制中不需要结构动力学模型,但是在主动构件优化配置中,在本文中,为了便于计算和仿真,采用线性的结构动力学模型.

1 基于自适应变论域模糊控制的智能结构一体化建模

设结构系统共有 n_c 个作动器,其机电一体化的有限元模型为

$$M\{\ddot{x}\} + C\{\dot{x}\} + K\{x\} = B \times F_c \quad (1)$$

式中包含 n 个线性微分方程, m 为结构系统的总体自由度, \ddot{x} 、 \dot{x} 、 x 分别为 $n \times 1$ 维的加速度、速度和位置矢量; M 、 C 、 K 分别为 $n \times n$ 维的总体质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; B 为 n_c 个作动器位置的矢量组成的 $n \times n_c$ 位置矩阵; F_c 为 $n_c \times 1$ 维作动器产生的控制力向量,且

$$F_c = K_v \{V(t)\} \quad (2)$$

式中 $K_v = \text{diag}(k_{vii}^3)$ 为对角阵, k_{vii}^3 为第 i 个作动器在单位电压作用下产生的控制力, K_v 反映了各作动器的控制效能.

设 φ_c 为前 n_c 阶特征向量构成的 $n \times n_c$ 维矩

阵, q 为前 n_c 阶模态坐标组成的向量,作模态截断 $\{x\} = \varphi_c \{q\}$,将系统坐标转换到模态坐标,得

$$\ddot{q} + g_s(\dot{q}) + g_d(q) = \varphi_c^T B F_c = f \quad (3)$$

式中 $g_s(\dot{q})$ 是速度阻尼项, $g_d(q)$ 是位移阻尼项, $f = [f_1, f_2, \dots, f_{n_c}]^T$ 为 $n_c \times 1$ 维模态控制力.

变论域模糊控制系统是一种输入与输出变量论域取值合理变化的模糊控制系统,如图 1 所示.文献 [11] 基于 Lyapunov 原理提出参数自适应律的概念,得到了自适应模糊控制系统稳定性的一般准则^[12],但并没有使用变论域技术,所以控制效果不佳;文献 [13] 指出变论域模糊控制器表现为一个 n 元分片插值函数,并建议采用一种基于经验公式的实用伸缩因子,并引入积分调节自适应原理,控制效果明显较佳,但这样设计的模糊控制器就带有很大的随机性和偶然性,控制器的性能不能从根本上得到改善.因为多输入多输出系统总是可以看成是多输入单输出的叠加,所以文中考虑多输入单输出的系统,本文针对隶属度函数的中心取值以及输入与输出变量论域取值的问题,从理论上设计一种基于参数自适应律的输入与输出的伸缩因子,基于 Lyapunov 原理设计一种稳定的自适应变论域模糊控制系统.

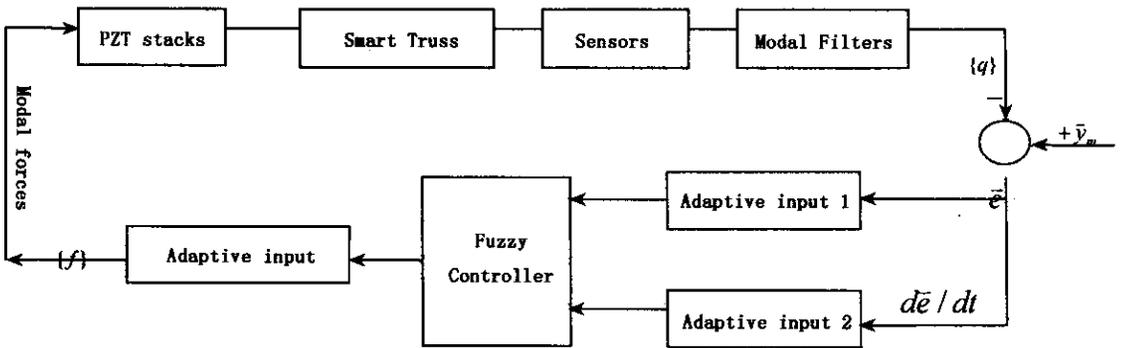


图 1 自适应变论域模糊控制器

Fig. 1 Adaptive fuzzy controller based on scaling universe of discourse

1.1 变论域模糊控制器

所谓变论域是指论域 $\bar{E} = (E_1, E_2, \dots, E_n)$ 和 U 可以随着变量 \bar{e} 和 u 的变化而进行合理的调整,

记为

$$E_i(\bar{e}) = [-\alpha_i(\bar{e})E_i^0, \alpha_i(\bar{e})E_i^0] \\ U(u) = [-\beta(u)U_0, \beta(u)U_0] \quad (4)$$

式中 $\alpha_i(\bar{e})$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 和 $\beta(y)$ 称为论域的伸缩因子 $[-E_i^0, E_i^0]$ 和 $[-U_0, U_0]$ 称为初始论域. 以三角形隶属度函数为例 ($2p_i + 1$) 表示 e_i 论域的划分个数 ($2q + 1$) 表示 u 论域的划分个数.

假设规则中的模糊集合为标准模糊集 (即具有一致性和完备性的规则集), 中心为 \bar{u}_i ($i = 1, 2, \dots, 2q + 1$), 采用乘积推理机、单值模糊器以及中心平均解模糊器, 三角形隶属度函数的重合度为 0.5, 可得

$$\begin{aligned} \mu_{A_i^1}(e_i) &= \begin{cases} 1 & -\alpha_i E_i \leq e_i \leq -(\alpha_i E_i - p_i) \\ -p_i e_i / \alpha_i E_i - (\alpha_i E_i - p_i) & -\alpha_i E_i \leq e_i \leq -(\alpha_i E_i - p_i) \end{cases} \\ \mu_{A_i^2}(e_i) &= \begin{cases} p_i e_i / \alpha_i E_i + p_i & -\alpha_i E_i \leq e_i \leq -(\alpha_i E_i - p_i) \\ -p_i e_i / \alpha_i E_i - (\alpha_i E_i - p_i) & -(\alpha_i E_i - p_i) \leq e_i \leq -(\alpha_i E_i - p_i) \end{cases} \\ \dots\dots \\ \mu_{A_i^{2p_i+1}}(e_i) &= \begin{cases} p_i e_i / \alpha_i E_i + (\alpha_i E_i - p_i) & (\alpha_i E_i - p_i) \leq e_i \leq \alpha_i E_i \\ 1 & \alpha_i E_i / p_i \leq e_i \end{cases} \end{aligned} \tag{6}$$

1.2 稳定性设计

考虑非线性系统

$$\begin{aligned} \dot{x}^{(n)} &= f(x, \dot{x}, \dots, x^{(n-1)}) + bu \\ y &= x \end{aligned} \tag{7}$$

目标是基于模糊逻辑系统设计一个反馈控制器 $u = u(x | (\bar{\alpha}, \beta))$, 使得系统输出在一定程度上跟踪逼近理想输出 $y_m(t)$, 文献 [12] 只考虑输出的隶属度函数的分布自适应, 而没有考虑到输入的分布自适应, 文献 [13] 设计了基于经验公式的变论域自适应控制, 但是这样设计的控制系统带有很大的随机性, 不能从理论上完全保证控制系统的稳定性. 基于控制系统设计的经验, 本文设计一种变论域的稳定的 $\bar{\alpha}$ 和 β 自适应律.

令 $e = y_m - y = y_m - x$, $\bar{e} = (e, \dot{e}, \dots, e^{(n-1)})^T$, $\bar{k} = (k_n, k_{n-1}, \dots, k_1)^T$, 使多项式 $s^n + k_1 s^{(n-1)} + \dots + k_n$ 所有根均在复平面左半开面上, 然后根据等效控制器的 (Certainty Equivalent controller) 原理, 选择控制律

$$u^* = \frac{1}{b} [-f(\bar{x}) + \dot{y}_m^{(n)} + \bar{k}^T \bar{e}] \tag{8}$$

则可以得到下面的闭环控制系统方程 $e^{(n)} +$

$$u = \frac{\sum_{l=1}^M \bar{u}^l (\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^l}(e_i))}{\sum_{l=1}^M (\prod_{i=1}^n \mu_{A_i^l}(e_i))} \tag{5}$$

采用自适应论域后, 将输出隶属度函数中心 \bar{u}_i ($i = 1, 2, \dots, 2q + 1$) 用论域 βU_0 表示成 $[-\beta U_0, -(q - 1)\beta U_0/q, \dots, -2\beta U_0/q, 0, \beta U_0/q, 2\beta U_0/q, \dots, (q - 1)\beta U_0/q, \beta U_0]$, 将输入变量的三角形隶属度函数 $\mu_{A_i^j}(e_i)$ (A_i^j 表示 e_i 的第 j 个模糊集合) 用输入隶属度函数的论域来表示, 即

$$\begin{aligned} e_i \leq -\alpha_i E_i \\ \dots\dots \\ \alpha_i E_i / p_i \leq e_i \end{aligned} \tag{6}$$

$k_1 e^{(n-1)} + \dots + k_n = 0$, 从 \bar{k} 的选择可知, 当 $t \rightarrow \infty$ 时 $e(t) \rightarrow 0$, 即系统的实际输出渐近地收敛于理想输出 y_m . 从式 (8) 中将 $f(\bar{x})$ 取出, 代入式 (7) 则有

$$\dot{e}^{(n)} = -\bar{k}^T \bar{e} + b[u^* - u] \tag{9}$$

令 $e_1 = e, e_2 = \dot{e}, \dots, e_n = e^{(n-1)}$, 而 $\bar{e} = (e, \dot{e}, \dots, e^{(n-1)})^T$, 求得 $\dot{\bar{e}} = (\dot{e}, \ddot{e}, \dots, e^{(n)})^T$, 所以

$$\dot{\bar{e}} = \Lambda \bar{e} + b[u^* - u] \tag{10}$$

式中

$$\Lambda = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ -k_n & -k_{n-1} & \dots & \dots & \dots & \dots & -k_1 \end{bmatrix}, \quad \bar{b} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

从上面的式 (5) 和式 (6) 可知, 针对 $\bar{\alpha}$ 和 β 设计自适应律, 在理论上控制输出解释式共有 $\prod_{i=1}^n (2p_i)$

+ 1)种形式,相应的 Lyapunov 分段函数共有

$\prod_{i=1}^n (2p_i + 1)$ 种形式

$$V = \frac{1}{2} \vec{e}^T P \vec{e} + \frac{b}{2\gamma} f^T(\vec{\alpha}, \beta) f(\vec{\alpha}, \beta) \quad (11)$$

式中, γ 是正常数, P 是一个正定矩阵且满足 Lyapunov 方程,且满足

$$A^T P + P A = -Q \quad (12)$$

式中, Q 是一个任意的正定矩阵.

从式(11)可以看出构造 Lyapunov 函数极其繁杂,设计出来的控制系统是以牺牲实时性为前提的.为避免分段 Lyapunov 函数问题,在设计中,我们可以先确定 $\vec{\alpha}$ 和 β 中的一个,由于输入隶属度函数比较繁杂,选择先确定 $\vec{\alpha}$,根据控制系统收敛的经验,设

$$\alpha_i(e_i) = 1 - \lambda_i \exp(-k_i e_i^2) \quad (13)$$

式中, λ_i, k_i 为已知的常数.将(13)式依次代入(6)和(5)式,则有

$$u = \frac{\sum_{l=1}^M \bar{u}^l (\prod_{i=1}^n \mu_{A_i}^l(e_i))}{\sum_{l=1}^M (\prod_{i=1}^n \mu_{A_i}^l(e_i))} = \beta \times \tau^T \times \xi \quad (14)$$

式中, β 为可调节的一个参数, $\tau \in R_{i=1}^{\prod(2p_i+1)}$ 是一个通过初始论域 U_0 表示中心的向量, $\xi \in R_{i=1}^{\prod(2p_i+1)}$ 是一个向量,其第 m 元素为 $\xi_m =$

$$\frac{\prod_{i=1}^n \mu_{A_i}(e_i)}{\sum_{l=1}^M (\prod_{i=1}^n \mu_{A_i}^l(e_i))}$$

考虑 Lyapunov 函数

$$V = \frac{1}{2} \vec{e}^T P \vec{e} + \frac{b}{2\gamma} (\beta^* - \beta)^2 \quad (15)$$

沿轨线式(10)对 Lyapunov 求关于时间的导数并保证

$$\dot{V} = -\frac{1}{2} \vec{e}^T Q \vec{e} + (\beta^* - \beta) \mathbf{I} \frac{1}{2} \tau^T \xi (\vec{b}^T P \vec{e} + \vec{e}^T P \vec{b}) - \frac{b}{\gamma} \dot{\beta} < 0 \quad (16)$$

取 $\dot{\beta} = \frac{\gamma}{2b} \tau^T \xi (\vec{b}^T P \vec{e} + \vec{e}^T P \vec{b})$,从式(16)中可以看出 $\dot{V} < 0$.

2 主动杆数目与位置优化

对于一个给定的结构系统及其相应的控制准则,所要求的模态控制力为

$$f = \varphi_c^T \times B \times F_c \quad (17)$$

定义输入能量相关矩阵为

$$r_v = \int_0^{t_f} (f \times f^T) dt \quad (18)$$

设输入能量相关矩阵 r_v 的特征值为

$$\Lambda_v = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\} \quad (19)$$

式(19)中非零特征值的数量 m_v 即是结构控制系统中所要求的独立的作动器数目.输入能量相关矩阵特征值的大小表明了作动器产生的能量多少.

在实际控制系统中,我们给定约束系数 k_v ,且 $k_v \leq 1$,设 l_v 为作动器的最佳数目,当如下关系式成立时

$$l_v \rightarrow \min \sum_{i=1}^{m_v} \lambda_i / \sum_{i=1}^{m_v} \lambda_i > k_v \quad (20)$$

式(20) l_v 中即为实际控制系统所需的最优作动器的数目.对于不同的结构系统,约束系数的取值也不同.对于对称性的大型空间桁架,其模态较密集,通常 k_v 取 0.65 ~ 0.85;对于模态稀疏的结构系统,例如悬臂梁,通常 k_v 取 0.8 ~ 0.95.

结构系统上的作动器的位置对结构系统振动控制效果具有重要的影响,因此有必要对作动器的位置进行优化,为使作动器实现优化配置,定义控制力价值函数

$$V = \int_0^t (F_c^T \times F_c) dt = \int_0^t \{f^T \times [(\varphi_c^T \times B)^{-1}] (\varphi_c^T \times B)^{-1} \times f\} dt \quad (21)$$

根据系统能量相应配置准则,作动器优化可以认为价值函数最小时的情形.式中 $(\varphi_c^T \times B)$ 如果不是方阵,求逆可以通过矩阵的奇异值分解来完成.

3 基于整数编码的遗传算法

(1) 整数编码(Integer Coded)

按照有限元方法的节点和构件的排列顺序进行编号,定义染色体为 $C = [p_1, p_2, \dots, p_{n_p}]$,其中, n_p 为可能被配置作动器的杆配置, p_1, p_2, \dots, p_{n_p} 为

整数,且满足 $1 \leq p_i \leq n_p$. 选取随机数 $pick \in (0, 1]$, 整数编码为

$$round[\minbound + (\maxbound - \minbound) \times pick] \quad (22)$$

\maxbound 和 \minbound 分别为变量的最大限制和最小限制, $round$ 表示取整.

(2) 选择操作

在遗传算法中,选择操作是从旧种群中选择优质个体,淘汰部分个体,产生新种群的过程. 适应度 (Fitness) 是评价个体好坏的指标,适应度越大,繁殖的概率越大,遗传算法正是基于适应度对个体进行选择,以保证优质个体在下一代中产生更多的子个体. 两两竞争法 (Tournaement) 每次随机地在种群 P1 中选取两个个体,选择适应度大的个体;若两者相同,只取其中的一个,直到选出的个体数为种群数目 (Sizepop), 得到种群 P2.

(3) 交叉操作

$$c' = \begin{cases} c + round((\maxbound - c) \times (1 - rand^{(\frac{1-pop_{cur}}{pop_{max}})^2})) & \text{if } rand > 0.5 \\ c - round((c - \minbound) \times (1 - rand^{(\frac{1-pop_{cur}}{pop_{max}})^2})) & \text{if } rand \leq 0.5 \end{cases} \quad (26)$$

4 计算与仿真

参考文献 [14] 设计 T 型航天桁架, 共有 52 个铰链节点, 斜杆 71 根, 直杆 90 根, 杆件使用铝材料. 直杆长度为 0.335 m, 所有桁架单元的外径为 3.968 mm, 内径为 3.078 mm, 节点编号如图 4 所示, 固结点为 1、2、27 和 28 节点. T 型航天桁架的 1-5 阶的模态频率分别为 14.64 Hz、16.26 Hz、30.41 Hz、33.97 Hz 和 62.93 Hz, 其中, 第一和第二阶模态、第四和第五阶模态为密频模态, 第三阶模态为扭转模态, 反映了桁架结构的动力学特性. 主动构件使用文献 [15] 设计主动杆的方法, 使用 PZT-5 压电陶瓷作为主动材料, 压电陶瓷片的直径为 15 mm, 厚度 1 mm, 压电堆的长度为 0.08 m, 由 70 片压电陶瓷片组成.

进行数值仿真计算, 为减少仿真时间, 在系统收敛稳定的条件下, 系统仿真步长取为 0.1. 当取 1, 2, 3, 4, 5 根主动杆时, 式 (20) 左边分别为 0.65726, 0.86559, 0.95791, 0.99087, 0.99564, 从理论

交叉操作用以产生新的个体, 从而检测搜索空间中新的点. 基于整数编码的遗传算法交叉操作把参数 a, b 操作成 $g_1(a, b), g_2(a, b)$. 函数 g_1, g_2 采取的形式具有多样化, 只需满足 $a + b = g_1(a, b) + g_2(a, b)$ 就行. 我们采用如下方法:

$$\begin{aligned} g_1(a, b) &= round[(1 - \alpha)a + \beta b] \\ g_2(a, b) &= round[(1 - \beta)b + \alpha a] \end{aligned} \quad (23)$$

其中, α, β 为 (0, 1) 区间上的随机数.

(4) 变异操作

变异操作的最终效果是把某个个体的参数 c 操作成域内的另一值 c' . 随机选取个体为

$$round(pick \times sizepop) \quad (24)$$

式中, 随机数 $pick \in (0, 1]$. 寻找变异位置

$$pos = round[pick \times \sum lenchrom] \quad (25)$$

式中, 随机数 $pick \in (0, 1]$, $lenchrom$ 为个体长度. 则变异操作为

上讲, 取 3 根主动杆已经足够. 从图 2 中可以看出, 在迭代初期, 适应度取值较大, 随着迭代次数的增加, 适应度变化也较大, 适应度趋向于收敛. 主动杆位置优化结果如表 1 所示, 位置示意图如图 3 下, 加粗部分为主动杆.

建立 T 型桁架结构基于模态空间的结构动力学模型, 使用模态控制方法, 则模糊控制器为双输入和单输出的模糊逻辑系统, 使用 Mamdani 型模糊逻辑系统, 实践表明, 隶属度函数的类型对模糊控制影响并不大, 所以在本文中使用三角形隶属度函数, 解模糊方法为面积中心法.

表 1 优化结果 (种群规模 10, 交叉概率 0.9, 变异概率 0.2)

Table 1 Optimal results using the integer coded GAs (Population size $p_{op} = 10$, probability of crossover $p_c = 0.9$, probability of mutation $p_m = 0.2$)

Optimal type	Max generations	Fitness	The locations
Only an actuator	100	252.2126	150
total 2 actuators	200	987.2810	150 25
total 3 actuators	200	2988.5	122 102 100

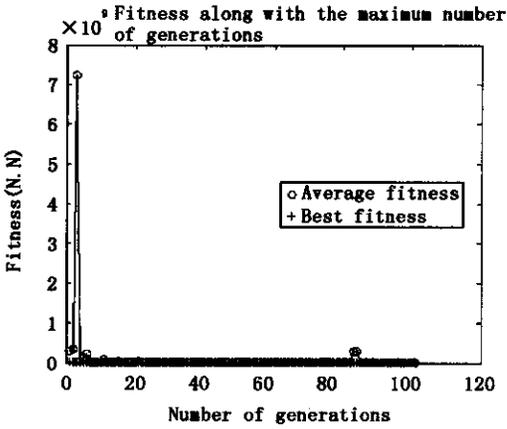


图2 适应度-迭代次数关系变化图

Fig.2 Fitness along with the maximum number of generations

设置参数为 $k_i = 1 (i = 1, 2)$ 为 1, $\lambda_1 = 0.97$, $\lambda_2 = 0.8, \beta_0 = 1$ 将论域分为七个隶属度函数, 分别用表示 positive big (PB), positive middle (PM), positive small (PS), zero (ZR), negative small (NS), negative middle (NM) 和 negative big (NB) 表示, 使用如表 2 的模糊控制规则, 设激励类型为谐波 $f(t) = 0.05\sin(10t)$ 进行仿真, 从 2.5 s 后施加模糊控制力, 得到节点 52 的位移如图 4 所示, 各主动杆的控制电压如图 5 所示, 从图中可以看出自适应变论域模糊控制器具有很好的效果.

表 2 模糊控制规则表

Table 2 Fuzzy control rules list

U \ E	E						
EC	NB	NM	NS	ZR	PS	PM	PB
NB	NB	NM			NS	NS	ZR
NM	NM		NM	NS	ZR	PS	PS
NS	NS		NS	ZR	PS	PM	
ZR	NS		ZR	PS	PM	PM	PM
PS	NS	ZR	PS	PM	PM	PM	
PM	ZR	PS	PM	PM	PM	PM	PM
PB	ZR	PS	PM	PM	PM	PM	PM

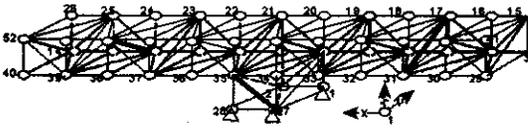


图3 主动杆配置示意图

Fig.3 Location of active members in a truss

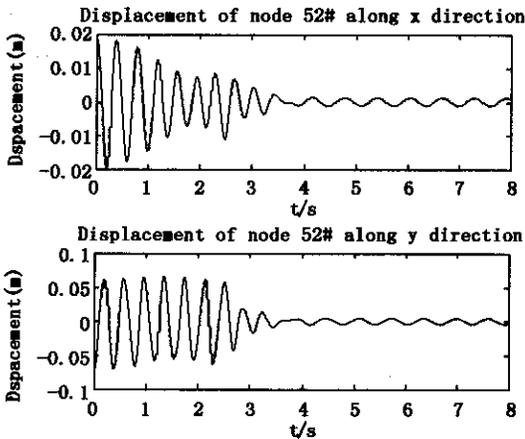


图4 节点 52 在 x 和 y 方向的位移响应

Fig.4 Displacements of node 52# along x and y direction

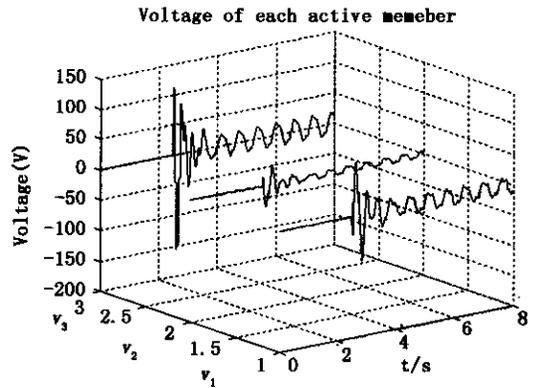


图5 各主动杆上的电压

Fig.5 Voltage of each active member

5 结论

目前, 将控制增益直接考虑到作动器优化建模中去的研究只局限于线性反馈控制律, 而对于非线性反馈控制律, 如模糊控制律, 还没有成熟的方法, 本文首次使用数值方法进行求解, 解决非线性反馈控制律设计作动器优化的问题.

一般来说,对于梁、板等连续疏频结构,作动器布置在根部能起到很好的控制效果,但是对于大型离散密频结构,作动器还应考虑布置在适当远离根部的位置.在仿真中主动杆配置在 12-50 节点、27-35 节点和 31-17 节点.

基于整数编码的遗传算法由于交叉生成新个体的能力有限,所以易收敛未成熟解,选择合适的参数对于基于整数编码的遗传算法很重要^[16,17].通常浮点数编码遗传算法的交叉概率 ≤ 0.6 ,变异概率 ≤ 0.1 ,在本文中取交叉概率 0.9,变异概率 0.2,就是为了增强生成新个体的能力.

参 考 文 献

- 1 阎绍泽.航天器中含间隙机构非线性动力学问题及其研究进展.动力学与控制学报,2002,2(2):48~52(Yan Sha-ze. Development and Problems of Nonlinear Dynamics of the Mechanisms with Clearances for Spacecrafts. *Journal of Dynamics and Control*, 2002, 2(2):48~52 (in Chinese))
- 2 徐建国.复杂挠性结构系统动力学、稳定性与控制.郑州:黄河水利出版社,2002(Xu Jianguo. Complex flexible structural system dynamic, stable and control. Zhongzhou: Huanghe Irrigation Press, 2002(In Chinese))
- 3 Yan YJ, Yam LH. Optimal design of number and locations of actuators in active vibration control of a space truss. *Smart Materials and Structures*, 2002, 11(2):496~503
- 4 张宏伟,徐世杰,黄文虎.作动器传感器配置优化的遗传算法应用.振动工程学报,1999,12(4):529~534(Zhang Hongwei, Xu Shijie, Huang Wenhui. Global optimization of actuators/sensors placement using a float-encoding genetic algorithm. *Journal of Vibration Engineering*, 1999, 12(4):529~534 (In Chinese))
- 5 Yongli Junjiro Onoda, Kenji Minesugi. Simultaneous optimization of piezoelectric actuator placement and feedback for vibration suppression. *Acta Astronautica*, 2002, 50(6):335~341
- 6 刘福强,张令弥.作动器/传感器优化配置的研究进展.力学进展,2000,25(4):506~516(Liu Fuqiang, Zhang Ling-mi. Advances in optimal placement of actuators and sensors. *Advances in Mechanics*, 2000, 25(4):506~516 (In Chinese))
- 7 Sreenatha AG, Makarand Pradhan. Fuzzy logic controller for position control of flexible structures. *Acta Astronautica*, 2002, 50(11):665~671
- 8 Gustavo Luiz CM, de Abreu José F. Ribeiro. A self-organizing fuzzy logic controller for the active control of flexible structures using piezoelectric actuators. *Applied Soft Computing*, 2002, 1(4):271~283
- 9 TsoLiang Teng, ChengPing Peng, Chun Chuang. A study on the application of fuzzy theory to structural active control. *Compute Methods in Applied. Mechanics and Engineering*, 2000, 189(99):439~448
- 10 阎石,李宏男.模糊结构振动控制研究的进展.沈阳建筑工程学院学报,2000,16(12):95~98(Yanshi, Li Hong-nan. Development of fuzzy structure vibration control. *Journal of Shenyang Architecture and Civil Engineering Institute*, 2000, 16(12):95~98 (In Chinese))
- 11 Wang LX. Stable adaptive fuzzy control of nonlinear systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 1993, 1(2):146~155
- 12 Xihong Wang, Tadashi Matsumoto. New time-domain stability criterion for fuzzy control systems. *IEICE Transactions on Fundamental of Electronic, Communications and Computer Sciences*, 1996, E79-A(10):1700~1706
- 13 李洪兴.非线性系统的变论域稳定自适应模糊控制.中国科学(E辑),2002,32(2):211~223(Li Hongxing. Adaptive fuzzy control of nonlinear systems based on scaling universe of discourse. *Science in China (Series E)*, 2002, 32(2):211~223 (In Chinese))
- 14 Johnson SE, Vlattas J. Modal analysis and active vibration control of the Naval Postgraduate School space truss [Master's Thesis]. California Naval Postgraduate School, June 1998
- 15 李俊宝.智能桁架结构设计、建模与阻尼控制的理论和实验研究 [博士论文].南京:南京航空航天大学,1996(Li Junbao. Theoretical and experimental study on design, modeling and active damping control of intelligent truss structures [PHD Thesis]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 1996 (In Chinese))
- 16 Ioannis G. Damousis, Anastasios G. Bakirtzis and Petros S. Dokopoulos. A Solution to the unit-commitment problem using Integer-Coded Genetic Algorithm. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2004, 19(2):1165~1172
- 17 雷德明.一种新型自学习模糊控制器.信息与控制,2000,29(6):559~564(Lei De-ming. A new type of self-learning fuzzy controller. *Information and Control*, 2000, 29(6):559~564 (In Chinese))

OPTIMAL DESIGN OF NUMBER AND LOCATIONS OF ACTUATORS WHEN ADOPTING THE ADAPTIVE FUZZY CONTROL IN ACTIVE CONTROL*

Si Hongwei Li Dongxu

(*College of Astronautics and Material Engineering , National University of Defense Technology , Changsha 410073 ,China*)

Abstract This paper presented the optimal design methodology of number and locations of actuators in active vibration control when adopting adaptive fuzzy control. The number of actuators was determined by defining the energy correlative matrix of the modal control force. Based on the total energy of active member forces, the model of optimal locations was studied. The integer coded genetic algorithms (GAs) were adopted to search the optimal locations of the actuators in large discontinuous structures. Finally the simulations of a space smart truss were done, and the results showed that the integer coded genetic GAs and adaptive fuzzy active vibration control were effective.

Key words smart truss, fuzzy control, vibration control, integer coded, active members