中国科学: 技术科学 2011 年 第 41 卷 第 5 期: 602 ~ 610
www.scichina.com tech.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

空间智能桁架的传感器作动器位置优化和分散化自适应模糊振动控制

李东旭*, 刘望, 蒋建平, 许睿

国防科学技术大学航天与材料工程学院, 长沙 410073
* E-mail: dongxuli@263.net

收稿日期: 2010-12-08; 接受日期: 2011-01-31
国家自然科学基金(批准号: 10472006)资助项目

摘要 提出了作动器和传感器配置优化和分散化自适应控制方法以解决桁架系统的振动控制问题. 建立了主动杆的机电耦合方程, 提出了不依赖于控制方法的优化准则, 采用遗传算法得到了作动器和传感器在大型空间智能桁架系统中的最优位置. 而且设计了一种分散化自适应模糊振动控制器来控制大型空间智能桁架系统. 推导了大型空间智能桁架系统考虑剩余模态影响的动力学方程, 利用滑模控制方法改进了自适应模糊控制方案, 并以 T 字型桁架结构为例进行了验证性实验. 实验结果表明, 遗传算法对于作动器和传感器的配置优化是可靠的、有效的, 自适应模糊控制器能有效地抑制大型空间智能桁架系统的振动, 且没有控制溢出和观测溢出问题.

关键词
空间智能桁架
主动振动控制
自适应模糊控制
分散化控制
遗传算法

大型空间桁架结构在航天器中有着广泛的应用, 例如航天飞机雷达地形测绘任务中支撑桁架结构和国际空间站的支撑桁架结构等[1]. 这类结构具有一些特殊的动力学特性, 比如低刚度、弱阻尼比、低固有频率等. 由于这些特性, 大型空间桁架结构极易发生振动. 如果桁架结构受到来自外部空间的碎片撞击, 或者如果航天器作姿态机动运动, 桁架结构的振动将被激起. 一旦振动发生, 它将给桁架支撑的有效载荷带来十分严重的问题[2]. 因此, 大型空间桁架结构的振动控制非常重要.

近年来, 利用压电作动器和传感器对智能桁架结构进行主动振动控制取得了很大的进展[3~6]. 大型空间智能桁架系统不是常规的大型空间桁架结构, 它是由普通杆和主动杆组成的复杂桁架系统, 每个主动杆中至少有一个作动器和一个传感器. 大型空间智能桁架系统振动控制的关键点之一是作动器和传感器的位置配置. 作动器和传感器的位置优化是大型空间智能桁架结构振动控制中的必要工作.

然而, 用于作动器和传感器配置优化的传统方法非常耗时, 不适合用于大型空间智能桁架这类复杂系统[6]. 因而急需发展可用于大型空间智能桁架系统的新的优化方法. 遗传算法是一种随机性搜索算法, 不需要利用目标函数梯度. 算法收敛速度快, 利用该算法我们可以得到全局最优解. 因此, 遗传算法用于大型空间智能桁架系统的作动器和传感器配置优化是可行的.

由于大型空间智能桁架系统非常复杂, 所处的空间环境不确定, 桁架又具有非线性、时变性等动力

英文版发表信息: Li D X, Liu W, Jiang J P, et al. Placement optimization of actuator and sensor and decentralized adaptive fuzzy vibration control for large space intelligent truss structure. Sci China Tech Sci, 2011, 54: 853–861, doi: 10.1007/s11431-011-4333-0

学特点, 因而难以建立大型空间智能桁架系统精确的动力学模型. 因此, 那些依赖精确动力学模型的传统控制方法不适应于大型空间智能桁架系统. 模糊控制方法鲁棒性好, 不需要特别精确的动力学模型[7~9]. Marinaki 等人研究了应用 PSO 算法优化的模糊控制器进行梁的振动控制[10]; Sun 研究了挠性航天器的模糊预测振动控制[11]; Zhu 等人研究了采用滑模模糊进行挠性航天器的振动和姿态机动控制[12]. 所有这些研究都取得了较好的控制结果, 然而关于空间桁架结构的模糊振动的研究很少.

本文提出了一种所谓的分散化自适应模糊控制方法. 大型空间智能桁架系统中含有由压电陶瓷堆作动器和PVDF传感器组成的主动杆, 每个主动杆含有一组传感器和作动器. 大型空间智能桁架系统是一个多输入、多输出系统, 如果将一般的模糊控制方法应用于大型空间智能桁架系统这样的多输入、多输出系统, 系统将十分庞大和复杂, 这意味着几乎不可能解决大型空间智能桁架系统的振动控制问题. 本文设计了一种分散化自适应模糊控制器来解决大型空间智能桁架系统的振动控制问题. 验证性实验的结果表明, 遗传算法对于作动器和传感器的配置优化是可靠的、有效的, 自适应模糊控制器能有效地抑制大型空间智能桁架系统的振动, 且没有控制溢出和观测溢出问题.

1　空间智能桁架的动力学模型

本节主要介绍了空间智能桁架和压电主动杆的结构. 基于压电材料的作动理论, 建立了传感器和作动器的机电耦合模型. 采用有限元方法, 由拉格朗日方程求得了压电作动器的有限元动力学方程. 采用模态坐标变换, 将动力学方程解耦, 并转换到模态坐标系下.

1.1　作动器和传感器的机电耦合模型

设计压电作动器结构如图 1 所示. 压电陶瓷堆在电压作用下产生轴向伸缩, 球铰阻隔压电陶瓷弯曲载荷的输出, 预紧弹簧提供预紧力和预位移.

建立两自由度压电作动器动力学模型如图 2 所示. 采用有限元方法, 由拉格朗日方程可求得压电作动器的有限元动力学方程为

$$\boldsymbol{M}_{\mathrm{uu}}^{\mathrm{e}}\ddot{\boldsymbol{\delta}}+\boldsymbol{K}_{\mathrm{uu}}^{\mathrm{e}}\boldsymbol{\delta}=\boldsymbol{F}^{\mathrm{e}}+\boldsymbol{K}_{\mathrm{u\varphi}}^{\mathrm{e}}\boldsymbol{V}, \tag{1}$$

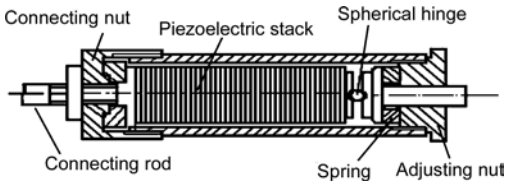

图 1　压电作动器结构示意

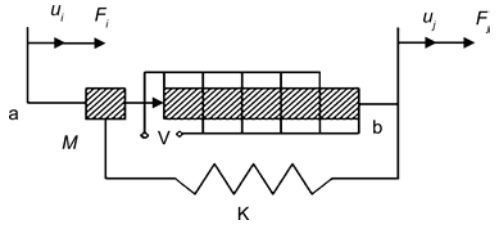

图 2　压电作动器动力学模型

其中, $\boldsymbol{M}_{\mathrm{uu}}^{\mathrm{e}}$, $\boldsymbol{K}_{\mathrm{uu}}^{\mathrm{e}}$, $\boldsymbol{K}_{\mathrm{u\varphi}}^{\mathrm{e}}$ 分别为单元质量矩阵、刚度矩阵和耦合刚度矩阵, $\boldsymbol{\delta}$为广义位移, $\boldsymbol{F}^{\mathrm{e}}$ 为广义力, $\boldsymbol{V}$ 为作动电压.

采用压电薄膜PVDF传感器, 与压电作动器串联在同一主动杆上. 传感方程可近似写为

$$\boldsymbol{Q}^{\mathrm{e}}=k_{\mathrm{Qu}}\boldsymbol{I}_{\mathrm{Qu}}^{\mathrm{e}}\boldsymbol{\delta}, \tag{2}$$

其中, $\boldsymbol{Q}^{\mathrm{e}}$ 为单元输出电荷, $\boldsymbol{\delta}$为主动杆两端节点位移向量, $\boldsymbol{I}_{\mathrm{Qu}}^{\mathrm{e}}=[-1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0]$, 系数 k_{Qu} 可通过实验或依据具体传感器模型推导得出.

1.2　空间智能桁架动力学模型

空间智能杆简化模型如图 3 所示.

空间智能桁架由普通杆件和压电作动杆组成. 设系统整体自由度为 n, 压电作动器数目为 n_{c}, 压电传感器数目为 n_{s}, 作动器与传感器布置于不同杆件. 整个空间智能桁架系统的有限元模型为

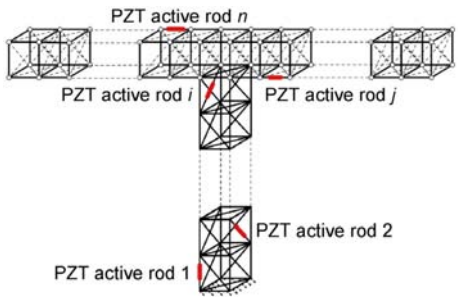

图 3　空间智能桁架结构

$$\begin{cases} \boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{\delta}} + \boldsymbol{C}\dot{\boldsymbol{\delta}} + \boldsymbol{K}\boldsymbol{\delta} = \boldsymbol{f}_{\mathrm{d}} + \boldsymbol{B}\boldsymbol{f}_{\mathrm{a}}, \\ \boldsymbol{Q} = \boldsymbol{K}_{\mathrm{l}}\boldsymbol{D}\boldsymbol{\delta}, \end{cases} \tag{3}$$

式中$\boldsymbol{\delta}\in\mathbf{R}^{n\times 1}$为节点位移矢量; $\boldsymbol{M}\in\mathbf{R}^{n\times n}$, $\boldsymbol{C}\in\mathbf{R}^{n\times n}$, $\boldsymbol{K}\in\mathbf{R}^{n\times n}$分别为系统总体质量矩阵、阻尼矩阵和刚度矩阵; $\boldsymbol{f}_{\mathrm{d}}\in\mathbf{R}^{n\times 1}$ 为智能桁架受到的外界扰动; $\boldsymbol{B}\in\mathbf{R}^{n\times n_{\mathrm{c}}}$, $\boldsymbol{D}\in\mathbf{R}^{n_{\mathrm{s}}\times n}$ 分别为压电主动杆和压电传感器方向余弦组成的位置矩阵; $\boldsymbol{Q}\in\mathbf{R}^{n_{\mathrm{s}}\times 1}$ 为观测器输出向量; $\boldsymbol{K}_{\mathrm{l}}=\mathrm{diag}(k_{\mathrm{l}}^{i})$, $k_{\mathrm{l}}^{i}=l_{si}b_{i}e_{i}$ 为第 i 个传感器的传感系数; $\boldsymbol{f}_{\mathrm{a}}\in\mathbf{R}^{n_{\mathrm{c}}\times 1}$ 为作动器产生的控制力向量, 且

$$\boldsymbol{f}_{\mathrm{a}} = \boldsymbol{K}_{\mathrm{v}}\boldsymbol{V}, \tag{4}$$

式中 $\boldsymbol{K}_{\mathrm{v}}=\mathrm{diag}(k_{\mathrm{uv}i}^{\mathrm{e}})$ 为对角阵, $k_{\mathrm{uv}i}^{\mathrm{e}}$ 为第 i 个作动器单位电压作用下产生的控制力, $\boldsymbol{V}$ 为作动电压向量.

考虑控制系统前 n_{c} 阶模态, 做模态坐标变换

$$\boldsymbol{\delta} = \boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{c}}\boldsymbol{\eta}_{\mathrm{c}}, \tag{5}$$

式中$\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{c}}$为前为 n_{c}阶模态振型向量组成的模态矩阵; $\boldsymbol{\eta}_{\mathrm{c}}$ 为前为 n_{c}阶模态坐标.

将(5)式代入(3)式, 并左乘 $\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}}$, 利用模态正交性可得

$$\begin{cases} \bar{\boldsymbol{M}}\ddot{\boldsymbol{\eta}}_{\mathrm{c}} + \bar{\boldsymbol{C}}\dot{\boldsymbol{\eta}}_{\mathrm{c}} + \bar{\boldsymbol{K}}\boldsymbol{\eta}_{\mathrm{c}} = \boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{f}_{\mathrm{d}} + \boldsymbol{f}_{\mathrm{mc}}, \\ \boldsymbol{Q} = \boldsymbol{K}_{\mathrm{l}}\boldsymbol{D}\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{c}}\boldsymbol{\eta}_{\mathrm{c}}, \end{cases} \tag{6}$$

式中, $\bar{\boldsymbol{M}}=\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M}\boldsymbol{\Phi}=\mathrm{diag}[1]$, $\bar{\boldsymbol{C}}=\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{C}\boldsymbol{\Phi}=\mathrm{diag}[2\xi_{i}\omega_{i}]$, $\bar{\boldsymbol{K}}=\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{K}\boldsymbol{\Phi}=\mathrm{diag}[\omega_{i}^{2}]$, $i=1,2,\cdots,n_{\mathrm{c}}$; ω_{i}, ξ_{i} 分别为第 i 阶振型的固有频率和模态阻尼比; $\boldsymbol{f}_{\mathrm{mc}}=\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}\boldsymbol{f}_{\mathrm{a}}$ 为 $n_{\mathrm{c}}\times 1$ 维模态控制力.

由于(6)式中两个方程均已解耦, 因而可实现独立模态空间解耦控制. 通过合理配置作动器位置, 避开模态节点, 可以使矩阵 $\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}$ 非奇异. 已知模态控制力 $\boldsymbol{f}_{\mathrm{mc}}$ 则可用下式求得实际压电作动器控制力

$$\boldsymbol{f}_{\mathrm{a}} = \left(\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}\right)^{-1}\boldsymbol{f}_{\mathrm{mc}}. \tag{7}$$

利用(4)式可进一步求得各作动器的控制电压

$$\boldsymbol{V} = \left(\boldsymbol{K}_{\mathrm{v}}\right)^{-1}\boldsymbol{f}_{\mathrm{a}}. \tag{8}$$

通过合理配置传感器位置可以使矩阵 $\boldsymbol{K}_{l}\boldsymbol{D}\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{c}}$ 非奇异, 则可用利用下式求得观测模态坐标

$$\boldsymbol{\eta}_{\mathrm{c}} = \left(\boldsymbol{K}_{l}\boldsymbol{D}\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{c}}\right)^{-1}\boldsymbol{Q}. \tag{9}$$

基于上面的分析可以建立起空间智能桁架独立模态空间振动控制实验系统, 如图 4 所示.

图 4 中控制器的设计仅考虑了前 n_{c}阶模态, 并没有考虑剩余模态的影响. 实际上, 采用(5)式所示的作动方程和 (7) 式所示的观测方程, 被控模态和剩余模态是相互作用的.

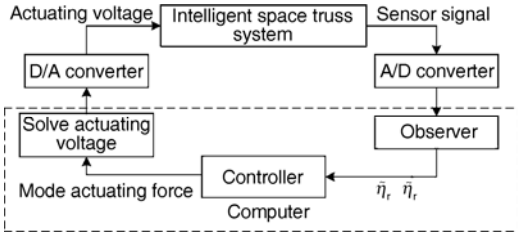

图 4 空间智能桁架独立模态空间控制系统

考虑所有模态, 观测器的实际输出向量为

$$\begin{aligned} \tilde{\boldsymbol{\eta}}_{\mathrm{c}} &= \left(\boldsymbol{K}_{\mathrm{l}}\boldsymbol{D}\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{c}}\right)^{-1}\boldsymbol{K}_{\mathrm{l}}\boldsymbol{D}\boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{\eta} \\ &= \boldsymbol{\eta}_{\mathrm{c}} + \left(\boldsymbol{K}_{\mathrm{l}}\boldsymbol{D}\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{c}}\right)^{-1}\boldsymbol{K}_{\mathrm{l}}\boldsymbol{D}\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{r}}\boldsymbol{\eta}_{\mathrm{r}}, \end{aligned} \tag{10}$$

式中 $\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{r}}\in\mathbf{R}^{n\times(n-n_{\mathrm{c}})}$ 为剩余模态向量矩阵, $\boldsymbol{\eta}\in\mathbf{R}^{n\times 1}$ 为完整的模态坐标, $\boldsymbol{\eta}_{\mathrm{r}}\in\mathbf{R}^{(n-n_{\mathrm{c}})\times 1}$ 为剩余模态坐标.

考虑所有模态, 实际模态控制力为

$$\boldsymbol{f}_{\mathrm{mc}} = \boldsymbol{\Phi}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}\boldsymbol{f}_{\mathrm{a}} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{f}_{\mathrm{mc}} \\ \boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{r}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}\left(\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}\right)^{-1}\boldsymbol{f}_{\mathrm{mc}} \end{bmatrix}. \tag{11}$$

也就是说控制器输出对剩余模态也有激励作用. 上面两个因素导致被控模态和剩余模态相互作用, 这也是产生控制溢出和观测溢出的原因.

由(8)式可以得到

$$\boldsymbol{\eta}_{\mathrm{c}} = \tilde{\boldsymbol{\eta}}_{\mathrm{c}} - \left(\boldsymbol{K}_{\mathrm{l}}\boldsymbol{D}\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{c}}\right)^{-1}\boldsymbol{K}_{\mathrm{l}}\boldsymbol{D}\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{r}}\boldsymbol{\eta}_{\mathrm{r}}. \tag{12}$$

将上式代入到(6)式中, 可以得到考虑剩余模态作用的控制方程为

$$\ddot{\tilde{\eta}}_{ci} + 2\xi_{i}\omega_{i}\dot{\tilde{\eta}}_{ci} + \omega_{i}^{2}\tilde{\eta}_{ci} = g_{i} + f_{\mathrm{mc}}^{i}\ (i=1,2,\cdots,n_{\mathrm{c}}), \tag{13}$$

式中

g_{i} 为 $\boldsymbol{g} = \left(\boldsymbol{K}_{\mathrm{l}}\boldsymbol{D}\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{c}}\right)^{-1}\boldsymbol{K}_{\mathrm{l}}\boldsymbol{D}\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{r}}\left(\bar{\boldsymbol{M}}\ddot{\boldsymbol{\eta}}_{\mathrm{r}} + \bar{\boldsymbol{C}}\dot{\boldsymbol{\eta}}_{\mathrm{r}} + \bar{\boldsymbol{K}}\boldsymbol{\eta}_{\mathrm{r}}\right)$

的第 i 行, f_{mc}^{i} 为控制器输出.

由上述方程可以看出, 剩余模态的作用可以等效为控制方程的干扰项. 传统的控制方法, 控制规律固定, 抗干扰能力不强, 容易产生控制溢出和观测溢出; 自适应模糊控制方法, 可以通过不断地自动调整控制规则, 克服干扰项的影响, 达到较好的控制效果. 因此, 可以把自适应模糊控制引入到空间智能桁架的振动控制中.

2　传感器作动器位置优化

随着智能结构控制技术的发展, 智能结构的传感器和作动器的位置优化问题正成为一个日益重要的问题. 通过传感器和作动器位置的选择, 可以改善控制器的性能[6]. 传感器和作动器位置优化问题包含两个内容: 传感器的位置和数量. 优化的结果质量不但影响控制效果和控制系统能量的消耗, 还严重关系到控制器的稳定性、可靠性以及系统的成本. 尤其对于复杂结构而言, 找到一个合适的优化方法显得尤为重要. 在本节中采用了一个不依赖于控制方法的优化准则.

2.1　优化准则

作动器和传感器的位置优化基于下面考虑: 作动器最优的位置是能使控制电压产生最大的模态控制力; 传感器的最优位置是能使被控模态产生最大的电荷输出.

令 $\boldsymbol{A}=\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{K}_{\mathrm{u}\varphi}$, 可以得到模态控制力与控制电压之间的关系如下

$$\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}\bar{\boldsymbol{A}}\boldsymbol{V}=\boldsymbol{f}_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{f}_{\mathrm{c}}, \tag{14}$$

其中 $\bar{\boldsymbol{A}}=\boldsymbol{A}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{A}$ 为 $n_{\mathrm{c}}\times n_{\mathrm{c}}$ 阶正定对称矩阵.

可以证明如下不等式成立

$$\lambda_{\min}^{\mathrm{a}}\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{V}\leqslant\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}\bar{\boldsymbol{A}}\boldsymbol{V}\leqslant\lambda_{\max}^{\mathrm{a}}\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{V}, \tag{15}$$

其中 $\lambda_{\min}^{\mathrm{a}}$ 和 $\lambda_{\max}^{\mathrm{a}}$ 分别为矩阵 $\bar{\boldsymbol{A}}$ 的最小和最大特征值.

将(14)式代入到(15)式中, 可得

$$\lambda_{\min}^{\mathrm{a}}\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{V}\leqslant\boldsymbol{f}_{\mathrm{c}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{f}_{\mathrm{c}}\leqslant\lambda_{\max}^{\mathrm{a}}\boldsymbol{V}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{V}. \tag{16}$$

可以看出, 作动效率与 $\bar{\boldsymbol{A}}$ 的特征值有关, 如果 $\bar{\boldsymbol{A}}$ 的所有特征值均集中分布且很大, 则可以保证系统作动效率很高. 综上分析选择作动器优化准则如下

$$J_{\mathrm{a}}=\left(\sum_{j=1}^{n_{\mathrm{c}}}\lambda_j^{\mathrm{a}}\right)\sqrt[n_{\mathrm{c}}]{\prod_{j=1}^{n_{\mathrm{c}}}(\lambda_j^{\mathrm{a}})}\to\max, \tag{17}$$

其中, λ_j^{a} 为 $\bar{\boldsymbol{A}}$ 的特征值.

同理, 可以选择传感器位置优化准则如下

$$J_{\mathrm{s}}=\left(\sum_{j=1}^{n_{\mathrm{c}}}\lambda_j^{\mathrm{s}}\right)\sqrt[n_{\mathrm{c}}]{\prod_{j=1}^{n_{\mathrm{c}}}(\lambda_j^{\mathrm{s}})}\to\max, \tag{18}$$

其中, λ_j^{s} 为矩阵 $\boldsymbol{B}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}$ 的特征值, 矩阵 $\boldsymbol{B}=\boldsymbol{K}_{\mathrm{Qu}}\boldsymbol{\Phi}_{\mathrm{c}}$.

由于在本文中, 力传感器是位于压电陶瓷堆的端部, 也就是说, 传感器和作动器是成对出现的. 传感器/作动器位置优化问题就成了多目标优化问题. 此时, 可以选择以下优化准则:

$$J=J_{\mathrm{a}}\cdot J_{\mathrm{s}}\to\max. \tag{19}$$

2.2　遗传算法

遗传算法是一种基于达尔文进化论的优胜劣汰、适者生存思想和群体进化学说的全局搜索算法, 它利用复制、交叉、变异等遗传操作来模拟自然进化, 完成问题寻优. 本文采用二进制编码进行遗传算法优化, 基本操作如下.

1) 编码与解码

将桁架所有可安装作动器和传感器的杆件从 1 开始排列, 序列号与可安装的杆件一一对应, 这样就可以把序列号作为优化的变量, 值域为[1, n], n 为可选杆件位置的总数. 将优化变量编码为二进制串, 设优化变量 x 所需二进制串长为 m, 则 m 满足下式

$$2^{m-1}<n-1\leqslant 2^{m}-1, \tag{20}$$

解码按下式计算

$$x=\left\langle 1+decical(y)\times\frac{n-1}{2^{m}-1}\right\rangle, \tag{21}$$

其中 $decical(y)$ 表示二进制串 y 的十进制值, $\langle\cdots\rangle$ 表示四舍五入函数.

2) 求解适应值

由于作动器的加入会改变整个系统的动力学方程, 因此每计算一个新的作动器位置, 都要重新计算系统参数, 为避免重复计算, 可以采用下面的方法: 首先计算不加作动器的桁架结构整体质量、刚度矩阵, 储存起来, 之后计算任一个作动器位置的适应值, 只需在整体矩阵相应位置减去普通杆件的部分后, 再把作动器的质量矩阵、刚度矩阵集成进来, 之后计算模态坐标特征向量进行模态转换, 再利用(17)式求解适应值. 传感器位置优化时, 如果传感器的加入对系统的动力学方程影响较小, 则计算时可忽略.

3) 交叉操作

设交叉概率为 p_{c}, 初始种群大小为 pop, 则随机选择出 $n=\langle pop\times p_{\mathrm{c}}/2\rangle$ 对染色体作为双亲, 采用多断点交叉法产生新的后代. 该法根据实际问题将染色体分为多个子串, 如对于本文问题, 则每个子串对应一个优化的位置信息. 交叉过程中针对每个子串都随机产生一个断点, 交换双亲每个子串断点右边的基因, 产生新的后代.

4) 变异操作

本文采用简单的变异操作方法, 设变异概率为 p_m, 针对每一个基因, 随机产生一个[0, 1]之间均匀分布的数 c, 如果 $c \leqslant p_m$, 则该基因进行否操作, 如原来为 0, 则变异后为 1.

5) 选择操作

本文的选择操作是基于扩大采样空间的选择. 按照这种选择策略, μ 个父代和通过交叉、变异操作产生的 λ 个后代一起竞争生存, 最后选出 μ 个适应值最高的构成下一代双亲.

整个遗传算法优化流程如图 5 所示.

3 控制器设计

模糊控制系统的设计主要包含三大步骤: 1) 输入和输出变量的选择; 2) 设计模糊控制器的 4 个组建; 3) 对输入变量进行前处理以及对输出变量的后处理[8]. 在本文中, 模糊控制器的输出变量是主动杆的控制电压.

3.1 输入变量选择

主动杆上力传感器输出信号为主动杆轴向内力 f_{in}^k, 其表达式为

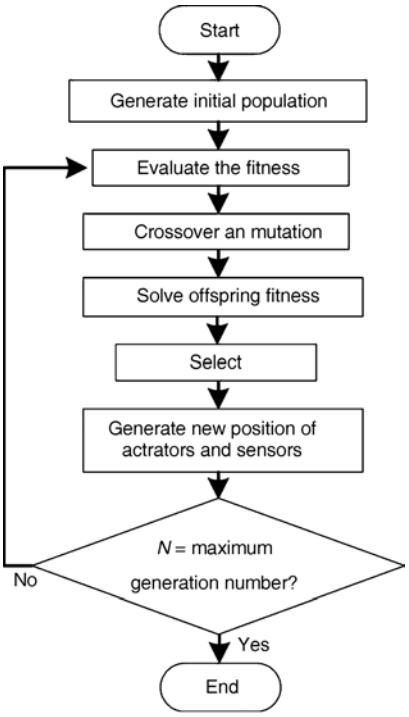

图 5 遗传算法流程图

$$f_{\text{in}}^k = k_{\text{e}} \boldsymbol{e} \boldsymbol{\delta}_k + k_{\text{e}} \bar{d}_{33} V, \tag{22}$$

式中 $k_{\text{e}} = k_1 k_2 k_3 / (k_1 k_2 + k_2 k_3 + k_3 k_1)$ 为压电主动杆等效刚度, $k_2 = E_2 A_2 / l_2$ 为压电陶瓷堆等效刚度, k_1, k_3 分别为压电陶瓷堆两端杆件的等效刚度; $\boldsymbol{\delta}_k$ 为单元坐标系下主动杆两端节点位移向量; $\bar{d}_{33} = n d_{33}$ 为压电陶瓷堆等效压电系数, $\boldsymbol{e} = [-1\ \ 0\ \ 0\ \ 1\ \ 0\ \ 0]$, V 为作动电压.

由于 f_{in}^k 包含作动力项 $k_{\text{e}} \bar{d}_{33} V$, 因此 f_{in}^k 无法正确反映被控系统的状态, 存在虚假控制($f_{\text{in}}^k \equiv 0$, 而系统振动并未得到有效控制)的可能性, 故不宜直接选用 f_{in}^k 作为模糊控制器输入信号. 对(2)式作如下变化

$$\varepsilon_k \cdot \boldsymbol{e} \boldsymbol{\delta}_k = f_{\text{in}}^k / k_{\text{e}} - \bar{d}_{33} V, \tag{23}$$

式中 ε_k 表示第 k 个压电主动杆两端节点轴向位移差, 它可以反映系统的振动状态, 因而对于第 k 对传感器和作动器选择 ε_k 作为输入信号更为合适.

为每一对传感器和作动器设计二维模糊控制器, 输入信号为误差 e_k 及其变化率 c_k, 表达式如下

$$\begin{cases} e_k(nT) = -\varepsilon_k(nT), \\ c_k = -\dot{\varepsilon}_k = -(\varepsilon_k(nT) - \varepsilon_k(nT - T))/T, \end{cases} \tag{24}$$

式中 T 为采样周期.

3.2 隶属度函数和控制规则

在本文中, 采用两个输入论域(E, C)和一个输出论域(V), 每个论域采用 7 个模糊子集(NL, NM, NS, ZO, PS, PM, PL). 其中 NL, NM, NS, ZO, PS, PM, PL 分别代表负大、负中、负小、零、正小、正中、正大. 采用三角形隶属度函数, 如图 6 所示.

本文所采用的模糊规则如表 1 所示. 表 1 中第 1 行和第 1 列是模糊控制器的输入量, 其他的则是模糊控制器的输出. 在编制模糊规则表时充分考虑了空间智能桁架的振动特性. 模糊控制器的输出曲面如

表 1 模糊控制规则表

u \ $\dot{e}$ / e	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PB	PM	PS	NS
NM	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	NM
NS	PB	PM	PS	PS	ZO	NS	NB
ZO	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB
PS	PB	PS	ZO	NS	NS	NM	NB
PM	PM	ZO	NS	NM	NM	NB	NB
PB	PS	NS	NM	NB	NB	NB	NB

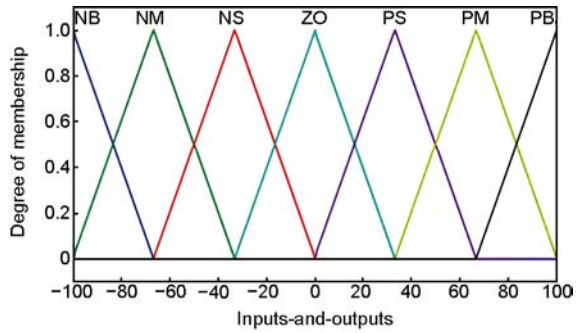

图 6　隶属度函数图

图 7 所示.

3.3　自适应律

控制方程(11)中的 n_c 个方程去掉干扰项之后是相互解耦的, 可以为每一个方程设计一个独立的自适应模糊控制器, 每个控制器控制变量 $\tilde{\eta}_{ci}$ 的期望输出 $\tilde{\eta}_m = 0$. 选择误差 e_i 及误差变化率 ec_i 作为第 i 个模糊控制器的输入, 具体表达式为

$$\begin{cases} e_i = \tilde{\eta}_m - \tilde{\eta}_{ci} = -\tilde{\eta}_{ci}, \\ ec_i = \dot{e}_i = -\dot{\tilde{\eta}}_{ci}, \end{cases} \tag{25}$$

式中 $\tilde{\eta}_{ci}$ 为观测器实际输出向量 $\tilde{\eta}_c$ 的第 i 行.

文献[13]设计的自适应模糊控制器, 以被控系统状态变量 x 为模糊控制器的输入, 模糊控制器输出为

$$u_D(\boldsymbol{x}/\boldsymbol{\theta}) = \boldsymbol{\theta}^T \boldsymbol{\xi}(\boldsymbol{x}), \tag{26}$$

其中, $\boldsymbol{\theta} \in \mathbf{R}^{m\times 1}$ 为待修改的模糊控制规则参数, $\boldsymbol{\xi}(\boldsymbol{x})$ 为 m 维向量, 第 k 个元素为

$$\xi_k = \frac{\prod_{i=1}^{n} \mu_{A_i^k}(x_i)}{\sum_{l=1}^{M}\left(\prod_{i=1}^{n} \mu_{A_i^l}(x_i)\right)}, \tag{27}$$

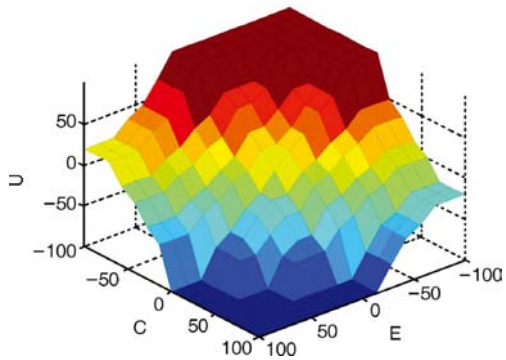

图 7　控制曲面

自适应率为

$$\dot{\theta} = \gamma \boldsymbol{p}_n^T \boldsymbol{e} \boldsymbol{\xi}(\boldsymbol{x}), \tag{28}$$

其中 γ 为学习率; $\boldsymbol{p}_n$ 为系数向量; $\boldsymbol{e}$ 为状态误差矢量.

上面设计的自适应模糊控制器存在以下不足.

1) 模糊控制器以状态变量 x 为输入变量, 当期望输出变化剧烈时, 控制规则没有继承性, 这样很容易造成控制规则的大幅度修改而使控制性能变坏.

2) 控制规则的修改只考虑了当前的控制性能 $\boldsymbol{p}_n^T \boldsymbol{e}$, 而没有考虑到性能的变化趋势, 导致部分控制规则的修改是不恰当的.

3) 控制规则的修改没有设上下限, 如果期望输出变化剧烈会导致部分规则重复、过度的修改, 如果控制器长时间在线运行会有控制规则发散的现象.

本文提出的改进措施如下.

1) 模糊控制器输入变量改为误差变量 $\boldsymbol{e} = (e, \dot{e}, \ddot{e}, \cdots, e^{(n-1)})$, 这样一来, 即使期望输出变化剧烈, 控制规则仍然有继承性.

2) 引入滑模控制的思想. 令 $\boldsymbol{S} = \boldsymbol{p}_n^T \boldsymbol{e}$, 根据滑模控制理论, 当满足条件 $\boldsymbol{S} * \dot{\boldsymbol{S}} \leqslant \varepsilon |\boldsymbol{S}|$ 时, 系统可以自动过渡到滑平面, 控制规则无需修改. 也就是说, 控制规则的修改需要同时考虑 $\boldsymbol{S}$ 及其变化率 $\dot{\boldsymbol{S}}$, 自适应率为两者的函数[8].

3) 根据控制系统实际可以提供的控制量设定控制规则中 $\boldsymbol{\theta}$ 的上下限.

改进后自适应模糊控制器结构框图如图 8 所示.

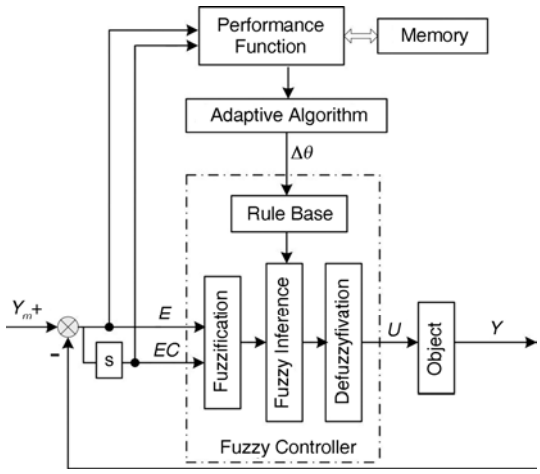

图 8　改进后自适应模糊控制器结构框图

3.4 比例系数选择

量化因子的选择一般通过经验判断和通过系统调试来获得, 选择并不是唯一的, 但可以做出一些定性的判断. 增大误差量化因子 K_e, 相当于增加了被控动力学系统的刚度; 增大误差变化量化因子 K_c 相当于增加了系统的阻尼. 增大 K_e 或增大 K_c 都可以提高控制精度, 但如果过大则会造成控制器过于"敏感", 而浪费过多电能.

在压电智能桁架的振动控制过程中, 由于作动器提供的作动力有限, 控制过程一般为振荡衰减过程. 因此, 误差量化因子 K_e 不宜取大, 那样会因为系统刚度增加而加剧振荡导致控制时间增长, 而 K_c 可以取大一些, 以增强阻尼的作用.

通常比例因子 K_u 的选择取决于航天器可提供的最大作动电压, 满足下式

$$K_u \leqslant V_{max} / |I|, \tag{29}$$

式中 V_{max} 为航天器可提供的最大作动电压, $|I|$为输出曲面绝对值的最大值.

4 实验结果

本节主要介绍了空间智能桁架结构振动控制系统的结构和参数. 然后采用遗传算法计算了主动杆的最佳位置, 并列出了优化结果. 最后采用分散化自适应模糊控制器进行了空间智能桁架的振动控制实验研究.

4.1 参数

智能桁架结构的模糊振动控制系统如图 9 所示. 该桁架由铝质空心杆件组成, 具体参数如表 2 所示. 其中桁架的主动杆结构如图 10 所示, 其具体参数如表 3 所示. 在实验中, 考虑了前 6 阶模态.

4.2 主动杆优化结果

表 4 给出了作动器和传感器位置优化结果. 图 11 中 max, min, mean 分别为每一代种群中的适应值最大值、最小值、平均值. 图 11 给出了配置 5 个作动器和 5 个传感器时考虑作动器对整体动力学模型影响的适应度收敛曲线. 从图 11 可以看出, 种群适应度在 120 代时收敛, 目标函数计算不足 10^4 次.

由此可知, 应用遗传算法可以解决作动器优化这类问题, 搜索过程是收敛的, 同时相对穷举算法可

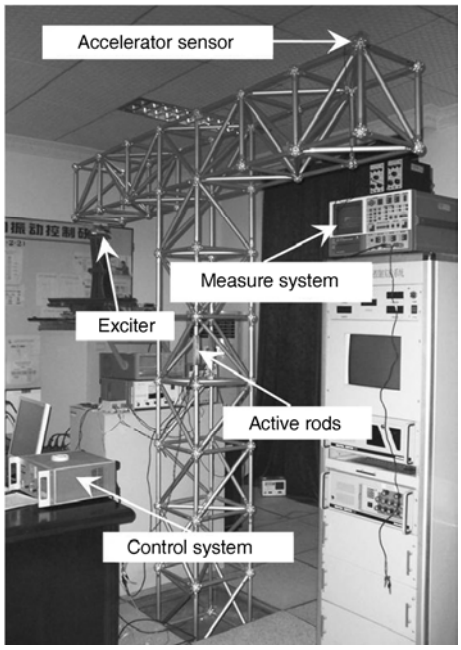

图 9 智能桁架振动控制实验系统

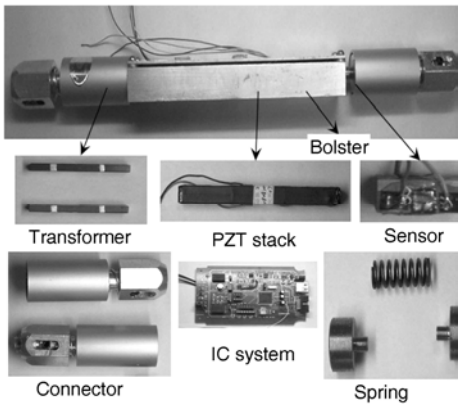

图 10 主动杆结构图

表 2 空间智能桁架参数

Item	Value
Size (m)	0.4×0.4×4.8
Rod number	161
Elastic modulus (GN/m^2)	72.7
Density (kg/m^3)	3100
Inside diameter (m)	0.012
Outside diameter (m)	0.008
Equivalent cross area (m^2)	6.28×10^{-5}
Connector weight (kg)	0.2

表 3　主动杆参数

Item	Value
Density (kg/m^3)	8000
Equivalent cross area (m^2)	6.283×10^{-5}
Elastic modulus (Pa)	2.1×10^{11}
PZT stack density (kg/m^3)	7600
PZT stack equivalent cross area (m^2)	7.07×10^{-4}
PZT elastic modulus (Pa)	6.3×10^{10}
PZT stack length (m)	0.16
Equivalent piezoelectric constant d_{33} (m/V)	5.6×10^{-8}
PZT patch number	140

表 4　主动杆优化结果

Placement	Fitness
(2–6), (3–7), (4–8), (33–37), (36–40)	6.8×10^{-9}

注. 表中(i-j)是指主动杆两端的节点号

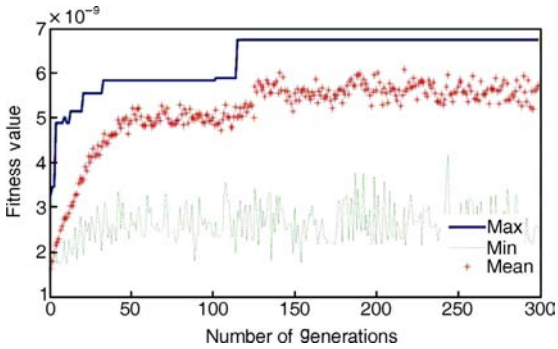

图 11　主动杆优化的收敛过程

大大节省计算时间, 提高计算效率.

4.3　振动控制结果

在空间中主要有 3 种干扰(脉冲干扰、周期干扰和白噪声干扰). 自适应模糊控制器的控制效果如下所示.

1) 脉冲干扰

在本实验中, 在桁架的顶端作用一个幅值为 200 N 力, 作用时间为 0.01 s. 桁架的开环无控响应和自适应模糊控制响应如图 12 所示.

2) 周期激励响应

在本实验中, 在桁架的顶端作用一个正弦激励, 其幅值为 1.414 N, 角频率为 31 r/s. 系统的响应如图 13 所示. 实验结果表明系统的开环无控响应振幅很大, 因为激励的频率与系统的第一和第二阶固有频率很接近. 系统的开环无控响应和自适应模糊控制的响应比较如图 14 所示.

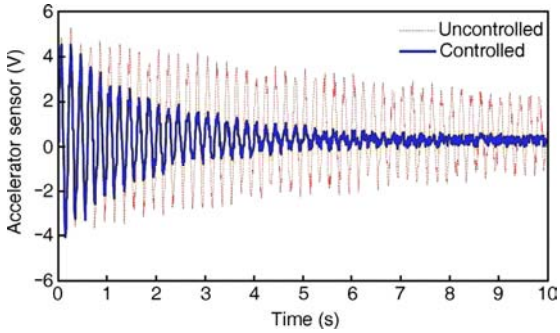

图 12　脉冲干扰相应

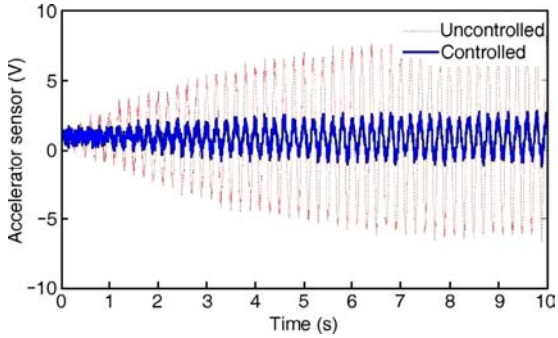

图 13　周期干扰响应

3) 白噪声干扰

在这个实验中, 在桁架的顶端施加一个随机白噪声干扰. 系统的开环无控响应和自适应控制响应如图 14 所示.

5　结论

本文研究了空间智能桁架的分散化自适应模糊振动控制问题, 通过实验得到了如下结论.

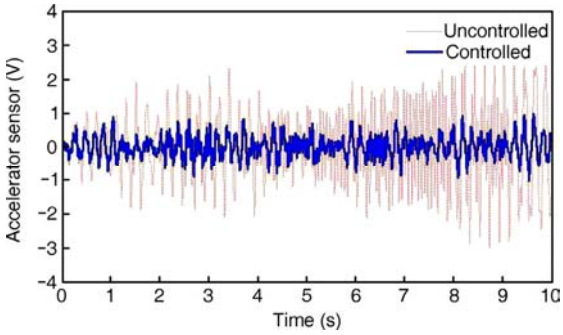

图 14　白噪声干扰响应

1) 遗传算法是求解传感器/作动器位置优化问题的有效方法, 该算法收敛速度快, 相对穷举算法能大大节省计算时间.

2) 本文所设计的适应模糊控制器在理论上为解决航天器大型挠性空间桁架的振动控制问题提供了一种方法和研究的基础.

3) 当理想输出变化平缓时, 自适应模糊控制器比普通模糊控制器有更好的控制效果, 尤其是针对非线性、时变性的控制对象; 当理想输出变化剧烈时, 改进的自适应模糊控制与普通模糊控制器和传统自适应模糊控制器相比具有更好的控制效果. 总之, 改进的自适应模糊控制器性能更优良、工作更稳定.

4) 改进的自适应模糊控制器对瞬态、周期激励和随机白噪声激励下的空间智能桁架振动均有很好的抑制效果, 而且控制效果明显优于普通模糊控制.

5) 基于自适应模糊控制器的空间智能桁架独立模态空间振动控制方法可以有效地抑制控制溢出和观测溢出.

参考文献

1 Kopsaftopoulos F P, Fassois S D. Vibration based health monitoring for a lightweight truss structure: Experimental assessment of several statistical time series methods. Mech Syst Signal Pr, 2010, 24(7): 1977–1997

2 Song G, Vlattas J, Johnson S E, et al. Active vibration control of a space truss using a lead zirconate titanate stack actuator. P I Mech Eng G-J Aer, 2001, 215(1): 355–361

3 Preumont A, de Marneffe B, Deraemaeker A, et al. The damping of a truss structure with a piezoelectric transducer. Comput Struct, 2008, 86(3-5): 227–239

4 Xu B, Jiang J S, Ou J P. Integrated optimization of structural topology and control for piezoelectric smart trusses using genetic algorithm. J Sound Vib, 2007, 307(3-5): 393–427

5 Gao W. Stochastically optimal active control of a smart truss structure under stationary random excitation. J Sound Vib, 2006, 290(3-5): 1256–1268

6 Gao W, Chen J J, Ma H B, et al. Optimal placement of active bars in active vibration control for piezoelectric intelligent truss structures with random parameters. Comput Struct, 2003, 81(1): 53–60

7 Luo Y, Xu M, Zhang X. Nonlinear self-defined truss element based on the plane truss structure with flexible connector. Comm Nonlinear Sci Numer Sim, 2010, 15(10): 3156–3169

8 Noroozi N, Roopaei M, Jahromi M Z. Adaptive fuzzy sliding mode control scheme for uncertain systems. Comm Nonlinear Sci Numer Sim, 2009, 14(11): 3978–3992

9 Wu T Z, Juang Y T. Adaptive fuzzy sliding-mode controller of uncertain nonlinear systems. ISA T, 2008, 47(3): 279–85

10 Marinaki M, Marinakis Y, Stavroulakis G E. Fuzzy control optimized by PSO for vibration suppression of beams. Control Eng Pract, 2010, 18(6): 618–629

11 Sun D Q. Hierarchical fuzzy generalized predictive control and its application in vibration suppression of flexible spacecraft. J Astronautics, 2009, 30(Compendex): 1537–1543

12 Zhu L, Song W, Hu Q. Active vibration suppression and attitude maneuvers of flexible spacecraft via fuzzy sliding control. In: Proceedings of the Chinese Control and Decision Conference. Yantai, 2008

13 Lin S C, Chen Y Y. Design of self-learning fuzzy sliding mode controllers based on genetic algorithms. Fuzzy Set Syst, 1997, 86: 139–153