

基于蚁群算法的车身振动主动控制研究

邢峰

(重庆工商职业学院 汽车工程学院, 重庆 400052)

摘要: 针对乘用车车身结构振动抑制问题, 采用基于蚁群算法的参数自适应 PID 控制器, 以压电元件为测量和控制元件, 进行了振动主动控制仿真和实验研究; 首先对白车身结构进行实验模态分析, 确定了压电元件的布片位置并确定压电控制的传递关系, 然后设计基于蚁群算法的 PID 参数自适应控制器, 制定了控制方案, 进行了模拟仿真分析, 最后搭建试验平台, 以某国产乘用车白车身为被控结构, 进行了车身振动主动控制实验; 系统仿真和实验结果表明, 施加控制时车身的振动幅值较未施加控制时大幅减小, 在振动幅值较大的低频区域, 其振动幅值明显降低; 从而验证了应用基于蚁群算法的参数自适应 PID 控制技术, 不仅可以有效降低车身的振动幅度, 而且对传统控制方法控制效果不佳的振动低频区域, 控制效果明显。

关键词: 蚁群算法; 自适应 PID; 压电; 振动控制

Research on Vibration Control of Car-body Based on Ant Colony Algorithm Self-adaptive PID Controller

Xing Feng

(Chongqing Technology and Business Institute, Chongqing 400052, China)

Abstract: Simulation and experiment research on active vibration control of white car-body were performed for the question of car-body vibration. Experimental model of white car-body is analyzed in the first place to determine the piezoelectric elements' position and the transitive relation of the structure. And then designed the PID parameters adaptive controller based on ant colony algorithm and developed a control scheme to make the simulation analysis. At last, the car-body vibration active control experiment was carried out with the piezoelectric element as the measurements and control components. The results of simulation and experiment show that the vibration active control of car-body is feasible to apply parameter adaptive PID controller based on ant colony algorithm.

Keywords: ant colony algorithm; self-adaptive PID; piezoelectric; vibration control

0 引言

乘用车车身的振动特性是衡量轿车乘坐舒适性的重要标志之一。传统的减振降噪措施往往与汽车的操控性能及轻量化等目标相矛盾, 而且无法有效抑制低频振动^[1]。在航空航天、车辆工程等领域中, 将压电智能材料应用到结构振动主动控制中, 已成为最具优势的研究思路和研究热点^[2-3]。

蚁群算法具有正反馈、分布计算和启发性搜索等特点, 不依赖被控对象的精确数学模型, 能有效地攻克十分困难的优化问题, 使处理问题更具灵活性、适应性和鲁棒性^[4]。本文将基于蚁群算法的 PID 控制策略应用于轿车车身振动控制, 进行实时仿真和实验研究, 以验证该控制策略对轿车车身振动控制的有效性。

1 车身模态分析和数学模型

首先对白车身进行实验模态分析, 确定压电元件最优布片位置, 并得到压电控制结构传递模型, 以进行有效控制。在白车身上布置 106 个测点, 使用激振器对白车身激振, 使车身结构在一定频率范围内振动, 数据采集分析系统把信号数字化, 计算频响函数。根据测得的频响函数确定白车身模态特性, 用

模态分析软件对试验函数进行曲线拟合, 从而得到白车身的模态振型, 如图 1 所示。

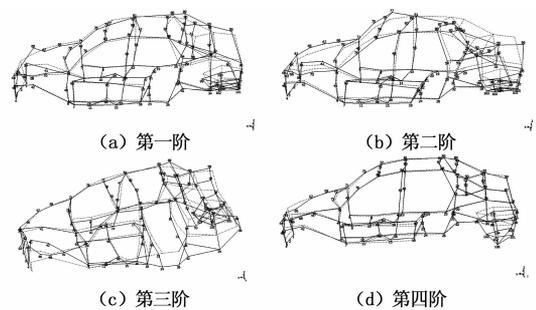


图 1 某乘用车白车身前四阶模态振型

白车身的前八阶实验模态频率和模态阵型列表, 如表 1 所示。

表 1 白车身的前八阶模态

| 阶次 | 试验频率(Hz) | 振型 |
|----|----------|---------------|
| 1 | 23.1 | 一阶扭转, 尾部扭转较明显 |
| 2 | 27.4 | 整车一阶扭转 |
| 3 | 36.5 | 整车 Y 向弯曲 |
| 4 | 40 | 尾部 Z 向弯曲 |
| 5 | 43.9 | 整车 Z 向一阶弯曲 |
| 6 | 47.5 | 局部 Z 向弯曲 |
| 7 | 49.1 | 二阶扭转 |
| 8 | 51.5 | 前部和尾部 Z 向弯曲 |

收稿日期: 2014-01-13; 修回日期: 2014-03-12。

基金项目: 重庆市教委科学技术研究项目(KJ111602)。

作者简介: 邢峰(1973-), 男, 山东淄博人, 工学硕士, 高级工程师, 副教授, 主要从事汽车测控技术方向的研究。

采用系统辨识方法, 根据测点之间的输入和输出数据, 利用 MATLAB 软件中的系统辨识工具箱, 建立白车身数学模型, 以进行控制仿真和实验分析。用系统的输入输出检测信息来估计系统状态空间表达式, 即系统状态方程模型估计, 如式 1 所示^[5-6]。

$$\begin{aligned} \mathbf{X}(k+1) &= \mathbf{A}\mathbf{X}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) \\ \mathbf{Y}(k) &= \mathbf{C}\mathbf{X}(k) + \mathbf{D}\mathbf{u}(k) \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $\mathbf{u}(k)$ 和 $\mathbf{Y}(k)$ 为输入输出向量, $\mathbf{X}(k)$ 为状态变量, \mathbf{A} 为系统矩阵, \mathbf{B} 为分配向量, \mathbf{C} 为量测向量, \mathbf{D} 为入出向量。

2 基于蚁群算法的 PID 参数寻优

蚁群算法是一种仿生优化方法, 在一系列组合优化问题求解中进行寻优, 利用正反馈原理加快速度过程, 求得最优解^[7]。

蚁群算法不要求被控对象的精确模型而且适应性强; PID 控制器结构简单, 控制精度高, 稳态无静差。将蚁群算法与 PID 控制器结合起来, 通过蚁群算法实时调整 PID 控制器参数, 从而实现了系统的特性变化与控制量之间的非线性映射关系, 融合了 PID 控制的简便性和蚁群算法的灵活性和鲁棒性。

基于蚁群算法的 PID 参数优化是将 PID 3 个参数组合在一起做为蚁群中的一只蚂蚁, 根据别的蚂蚁释放的信息素, 动态调整方向和路径向目标逼近, 最后找到最优目标路径, 即为控制器的最优参数^[8]。

蚂蚁从原点开始爬行, 第 k 只蚂蚁爬行至下一结点的路径选择概率为:

$$\varphi(i, y_i, t_j) = \frac{\tau(i, y_i, t_j)\eta(i, y_i, t_j)}{\sum_{y_i=0}^{12} \tau(i, y_i, t_j)\eta(i, y_i, t_j)} \quad (2)$$

式中, t_j 为某一时刻, $\eta(i, y_i, t_j)$ 为该时刻蚂蚁所处结点的信息能见度, $\tau(i, y_i, t_j)$ 为该时刻该结点的信息量, $\eta(i, y_i, t_j)$ 按式 (3) 确定:

$$\eta(i, y_i, t_j) = \frac{n - |y_i - \overline{y_i}|}{n} \quad (3)$$

式中, n 为节点数目, $\overline{y_i}$ 为当前最优路径对应的各结点纵坐标。

满足 $\sum_{y_i=0}^l \tau(i, y_i, t_j)\eta(i, y_i, t_j) > rand(*)$ 的最小 l 为下一时刻的爬行方向, $l = 0, 1, \dots, n, rand(*)$ 为随机函数, 自动生成 $[0, 1]$ 内数。

全部蚂蚁按上述过程完成一次爬行, 可以按下式计算所有蚂蚁爬行的目标函数值, 记录其中最小函数值的爬行路径, 就完成一次参数寻优。

当 $e_{tw} < 0$ 时,

$$J = \int_0^\infty (\omega_1 |e| + \omega_2 U^2 + \omega_3 |e_{tw}|) dt + \omega_4 t_w \quad (4)$$

当 $e_{tw} \geq 0$ 时,

$$J = \int_0^\infty (\omega_1 |e| + \omega_2 U^2) dt + \omega_4 t_w \quad (5)$$

式中, ω_1, ω_2 为权系数, ω_2 为时间常数, $e_{tw} = v_w(t_j) - v_w(t_{j-1})$ 为控制参数 v_w 的误差。

所有蚂蚁完成一次爬行后, 各结点信息量按下式更新。

$$\tau(i, y_i, t_j) = (1 - \rho)\tau(i, y_i, t_j) + \Delta\tau(i, y_i, t_j) \quad (6)$$

其中: ρ 为信息量挥发系数, $1 - \rho$ 表示信息量残留系数, $\Delta\tau(i, y_i, t_j)$ 为 t_j 时刻的结点信息量的增量, 若第 k 只蚂蚁经过 (i, y_i) , 则:

$$\Delta\tau(i, y_i, t_j) = \frac{Q}{L_k} \quad (7)$$

若第 k 只蚂蚁未经过 (i, y_i) , 则:

$$\Delta\tau(i, y_i, t_j) = Q \quad (8)$$

式中, L_k 为第 k 只蚂蚁在本次循环所走的路径长度, Q 为信息量强度。

最后进入下一循环, 直至完成 N_{\max} 次迭代, 得到最优解:

$$k_p = y_a \times 10^3 + y_b \times 10^2 + y_c \times 10^1 + y_d \quad (9)$$

$$k_i = y_e \times 10^3 + y_f \times 10^2 + y_g \times 10^1 + y_h \quad (10)$$

$$k_d = y_i \times 10^3 + y_j \times 10^2 + y_k \times 10^1 + y_l \quad (11)$$

基于蚁群的 PID 控制器优化算法流程归纳如图 2 所示。

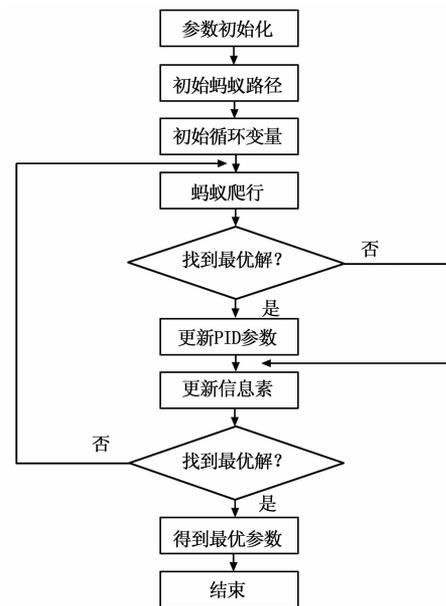


图 2 蚁群的 PID 参数优化算法流程图

3 仿真分析

汽车车身的振动是各阶模态振动的综合反映, 起主要作用的是前几阶模态, 特别是第 1、2 阶模态。车身动态特性的前 2 阶模态振动频率和发动机怠速激振频率接近, 很容易引起共振。所以汽车车身振动主动控制以车身低频振动抑制为主要目标^[9-10]。

在 MATLAB 的 Simulink 模块中建立基于蚁群算法的参数自适应 PID 控制模型, 如图 3 所示。

分别应用正弦和随机信号作为激振源信号, 对模型振动进行振动主动控制, 检测模型的振动情况, 得到控制前后模型振动的典型波形如图 4 所示。

从仿真控制结果可以看出, 无论采用正弦激励还是随机信号激励, 在进行振动控制后, 振幅都明显降低。说明基于蚁群算法的参数自适应 PID 控制可以有效抑制模型振动, 可以进一步进行振动主动控制实验研究。

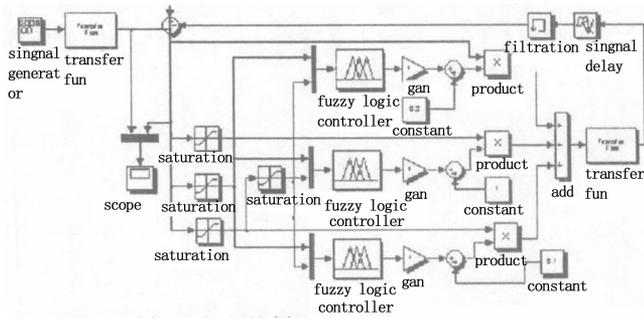


图 3 基于蚁群算法的控制器仿真模型

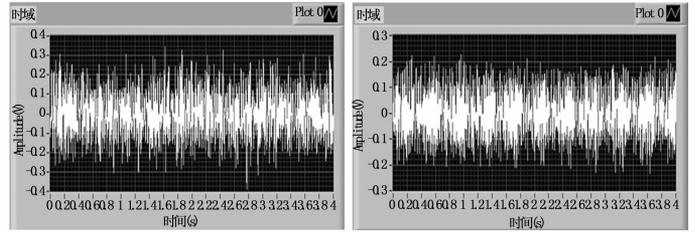


图 5 车身振动时域波形

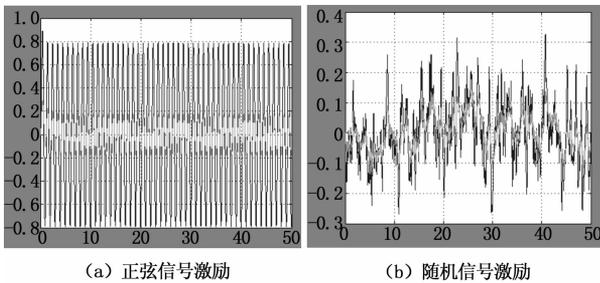


图 4 控制前后的振动波形对比

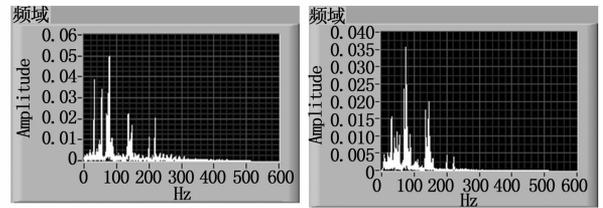


图 6 车身施加控制前后振动的频谱

4 实验研究

以悬吊的白车身作为被控制结构，将 8 组压电片粘贴在车身壁上作为致动器，每组致动器由两个压电片组成，一个压电片粘贴在板的顶面，另一个粘贴在对应的板底面。另有 4 组压电片粘贴在车身上作为传感器。主动控制系统包括 33220A 型函数发生器、YE5872 型功率放大器、JZK—20（200）型激振器、PZT—5 型压电片、HPV—C 型压电驱动电源、YE5852 型电荷放大器、PCI—1711 型数据采集卡等。

激振器通过正弦或随机信号驱动白车身振动。压电式传感器将振动变形信号转换为电信号，经 4 个电荷放大器滤波、放大后，通过数据采集卡输入到计算机。MATLAB 软件 Real—Time Workshop 模块进行数据处理产生控制信号，再通过数据采集卡输出到压电驱动电源，将信号转化为强电输送到压电致动器，提供给压电致动器的最大电压为 150V。压电致动器产生电致伸缩，带动嵌在一起的车身结构同时发生变形，从而实现结构对振动的自适应反应和对振动变形的自适应调整。

使用激振器对白车身持续激振，压电传感器可以检测到车身的振动幅度；打开控制器进行主动主动振动控制，并在线调整控制参数，以取得最好控制效果。控制前后振动的典型时域波形如图 5 所示。

可以看出对车身施加控制时的振动幅值较未施加控制时减小了 30% 左右。

控制前后的车身振动频谱如图 6 所示。

可以看出对车身施加控制后，在振动幅值较大的低频区域，其振动幅值明显降低。从而验证了该控制技术不仅可以有效降低车身的振动幅度，而且对传统控制方法控制效果不佳的振动低频区域，控制效果明显。

5 结论

针对乘用车车身振动控制问题，设计了蚁群算法与 PID 算法相结合的参数自适应控制方案，进行了主动控制仿真和试验研究。对车身模态进行了分析，设计了主动控制系统，阐述了应用压电传感器和致动器，通过控制器的输出直接控制车身的振动的实验过程。研究表明，应用该技术对轿车车身振动进行控制可以取得较好控制效果，控制方案可行。

参考文献：

- [1] 何渝生, 邓兆祥, 等. 汽车噪声控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1995.
- [2] 徐云峰, 靳晓雄. 车内噪声主动控制技术的研究 [J]. 噪声与振动控制, 2006, (1): 36—38.
- [3] 安孝文. 基于压电材料的车身薄壁结构振动主动控制研究 [D]. 吉林: 吉林大学, 2012.
- [4] 尹宏鹏, 柴毅. 基于蚁群算法的 PID 控制参数优化 [J]. 计算机工程与应用, 2007, 43 (17): 43—46.
- [5] 张成乾, 张国强. 系统辨识与参数估计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1986.
- [6] 方崇智, 萧德云. 过程辨识 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1988.
- [7] 彭沛夫, 胡斌, 张桂芳. 基于分布均匀度的自适应蚁群算法最优 PID 控制 [J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2006, (3): 15—18.
- [8] 吴春明, 陈治, 姜明. 蚁群算法中系统初始化及系统参数的研究 [J]. 电子学报, 2006, 34 (8): 1530—1533.
- [9] 周炜, 靳晓雄. 轿车车身板件振动自适应主动控制研究与实验 [J]. 同济大学学报, 2002, (8): 979—982.
- [10] 陈骏凯, 靳晓雄. 基于压电陶瓷的车内噪声模糊控制技术的研究 [J]. 中国科技信息, 2006, (16): 107—109.