

# 城轨列车悬挂系统显遗传自适应模糊控制<sup>\*</sup>

车 军, 韩 壮, 李广军, 刘潇潇, 任牟华, 王彩芸

(兰州交通大学机电工程学院 兰州, 730070)

**摘要** 为有效抑制城轨车辆行驶时悬挂系统出现的横向振动,提升车辆平稳性与舒适度,引入调控效果优于传统模糊控制的显遗传自适应模糊控制方法,扩展其收敛条件并证明其适用于城轨列车悬挂系统,扩大了该方法的使用范围。在 Matlab/Simulation 中根据时速为 80 km/h 的某型城轨列车参数搭建车辆悬挂系统模型,并设计了显遗传自适应模糊控制器。仿真实验结果表明,显遗传自适应模糊控制对城轨列车悬挂系统横向振动抑制效果良好,在其控制下列车横向合成加速度、横移振动加速度、侧滚振动加速度以及摇头振动加速度的最大值、均方根值以及功率谱密度值均有所降低。与普通模糊控制相比,显遗传自适应模糊控制能够有效抑制城轨列车横向振动,大幅度提高乘客舒适度。

**关键词** 城轨列车;悬挂系统;横向振动;显遗传自适应模糊控制

**中图分类号** TH113.1; TP273.4; U270.11

## 引 言

地铁是一种载客量大、运行速度高的运输方式,随着城轨列车的不断发展,乘车平稳性及舒适性已成为重要的考量依据<sup>[1]</sup>,而列车运行时产生的横向振动严重影响了车辆的平稳性及舒适性,抑制横向振动已成为目前提升城轨列车平稳性的有效途径。城轨列车横向悬挂系统不属于线性动力学系统<sup>[2]</sup>,系统建模和车辆控制算法的研究过程中存在较大困难,故研究城轨车辆悬挂系统控制策略对减少横向振动、提升车辆平稳性及舒适度具有重要意义。

实际行驶过程中悬挂系统参数具有非线性和不确定性,在量取列车参考数值时会出现误差,因而须使用特定算法调节列车悬挂系统参数。比例-积分-微分(proportion integration differentiation,简称PID)控制为最早采用的策略,因其鲁棒性好以及稳定性高,在过程调整和运动调整中均得到了广泛应用,对于可建立准确参考系的确定模型更为有效<sup>[3]</sup>,但在列车实际行驶中很难获取准确运行参数,数值整合过程复杂,使用PID控制很难达到较好的控制效果。模糊控制利用模糊推理方法,根据对具体问题的经验整合总结获得相应的控制规则及设定模糊

变量,得出符合要求的控制变量,控制对象无需精确数学模型。由于城轨列车悬挂系统的激扰具有随机性,其数学模型复杂程度高,采用模糊控制系统能较好地解决这类问题,因此在悬挂系统控制过程中应用广泛,但也存在控制精度低、控制规则无法调整及隶属度函数不可更改等缺陷。针对这一问题,笔者采用显遗传自适应模糊控制,在控制规则确定的前提下,该调控方式的输入输出论域随着偏差值的降低而缩减,反之则增大,能够有效提高控制器的调控精度及响应速度。

## 1 列车悬挂系统模型

当路线的方向干扰模拟数值远大于车轮与道路之间空隙时,列车车轮与轨道发生碰撞,从而引起列车横向位移,轨道不平顺引起的车轮震荡加速度向上传递至车体结构<sup>[4]</sup>。传递过程经由转向架,会引起转向架与列车车体上持续的横向位移、侧滚和摇头振动,这3种振动形式是导致车辆运动时横向稳定性差的主要原因,城轨列车悬挂系统模型如图1所示。城轨列车悬挂系统模型中包括轮对、车体、构架、可控阻尼器以及位移传感器模型,其中位移传感器对各振动参数进行测量。其数学模型为

<sup>\*</sup> 甘肃省科技支撑计划资助项目(1604GKCA003);甘肃省青年科技基金资助项目(1610RJYA036);兰州交通大学青年基金资助项目(2014017);兰州交通大学青年科学基金资助项目(2015020)

收稿日期:2019-03-03;修回日期:2019-05-06

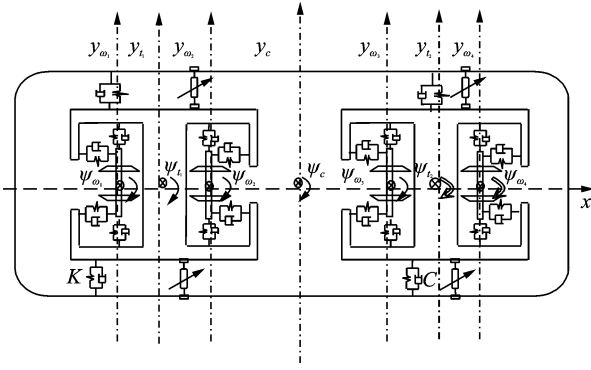


图1 城轨列车悬挂系统模型

Fig.1 Model of urban rail train suspension system

$$KX + C\dot{X} + M\ddot{X} = G\omega \quad (1)$$

$$X = [y_{\omega_1}, y_{\omega_2}, y_{\omega_3}, y_{\omega_4}, \psi_{\omega_1}, \psi_{\omega_2}, \psi_{\omega_3}, \psi_{\omega_4}, y_{t_1}, y_{t_2}, \varphi_{t_1}, \varphi_{t_2}, \varphi_c, \psi_c] \quad (2)$$

其中： $C$ 为阻尼阵； $M$ 为列车重量阵； $K$ 为刚度阵； $G$ 为轨道输入分布矩阵； $\omega$ 为轨道方向和水平激扰数值； $y_{\omega_1}, y_{\omega_2}, y_{\omega_3}$ 为列车车轮横向偏移量； $\psi_{\omega_1}, \psi_{\omega_2}, \psi_{\omega_3}, \psi_{\omega_4}$ 为车辆轮对摇头运动； $y_{t_1}, y_{t_2}$ 为列车转向架横移运动； $y_c$ 为车体横移运动； $\varphi_{t_1}, \varphi_{t_2}$ 为列车转向架侧滚运动； $\varphi_c$ 为车体侧滚运动； $\psi_{t_1}, \psi_{t_2}$ 为列车转向架摇头运动； $\psi_c$ 为车体摇头运动。

参考城轨列车车辆横向动力学系统模型，在Matlab/Simulation中构建悬挂系统仿真模型。该模型包括轨道不平顺输入模块、城轨车辆模型、模糊控制模块、数据处理模块以及数据输出模块。数据输出模块的输出值为可控阻尼器的调节电流值，从而控制阻尼可调减振器，城轨列车用阻尼可调减振器的阻尼 $c$ 与电流的关系 $I$ 为

$$c = 2.47 + 29.93I - 65.23I^2 + 54.37I^3 \quad (3)$$

采用Simulink仿真工具能够简化较为繁杂的系统模型，在仿真过程中可连续调整参数值，以获得

$$A_1(x(k), k) = \begin{cases} [x(k) - x_2(k)] / [x_1(k) - x_2(k)] & (x_1(k) \leq x(k) \leq x_2(k)) \\ 0 & (x_2(k) \leq x(k) \leq x_n(k)) \end{cases} \quad (5)$$

$$A_i(x(k), k) = \begin{cases} [x(k) - x_{i-1}(k)] / [x_i(k) - x_{i-1}(k)] & (x_{i-1}(k) \leq x(k) \leq x_i(k)) \\ [x(k) - x_{i+1}(k)] / [x_i(k) - x_{i+1}(k)] & (x_i(k) \leq x(k) \leq x_{i+1}(k)) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

$$A_n(x(k), k) = \begin{cases} 0 & (x_1(k) \leq x(k) \leq x_{n-1}(k)) \\ [x(k) - x_{n-1}(k)] / [x_n(k) - x_{n-1}(k)] & (x_{n-1} \leq x(k) \leq x_n(k)) \end{cases} \quad (7)$$

$$B_1(y(k), k) = \begin{cases} [y(k) - y_2(k)] / [y_1(k) - y_2(k)] & (y_1(k) \leq y(k) \leq y_2(k)) \\ 0 & (y_2(k) \leq y(k) \leq y_m(k)) \end{cases} \quad (8)$$

$$B_j(y(k), k) = \begin{cases} [y(k) - y_{j-1}(k)] / [y_j(k) - y_{j-1}(k)] & (y_{j-1}(k) \leq y(k) \leq y_j(k)) \\ [y(k) - y_{j+1}(k)] / [y_j(k) - y_{j+1}(k)] & (y_j(k) \leq y(k) \leq y_{j+1}(k)) \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

最优控制效果<sup>[5]</sup>。

## 2 显遗传自适应模糊控制

### 2.1 显遗传自适应模糊控制基本原理

参数自整定模糊控制方式包含潜遗传、显遗传以及逐步显遗传3种，其中，显遗传自适应模糊控制方法多用于控制双输入单输出系统模型，因此笔者以该方法为基础进行控制器设计。

定义：若 $A = \{A_i\} (1 \leq i \leq n, i \in N \text{ 且 } n \in N)$ 为给定论域集合 $X$ 上的模糊集，对于任意 $x \in X$ ，满足

$$\sum_{i=1}^n A_i(x) = 1 \quad (4)$$

$\{A_i\}, \{A_j\}$ 的局部峰值点分别为 $x_i$ 和 $x_j (1 \leq i \leq n, i \in N, 1 \leq j \leq n, j \in N)$ ，其中：若 $i \neq j$ ，则 $x_i \neq x_j$ ，此时称 $\{A_i\}$ 为 $A$ 的一个基元，并称 $A$ 为论域 $X$ 的基元组<sup>[6]</sup>。对于 $\forall x \in N, x \neq x_i$ ，若 $A_i(x) \neq 0$ 且 $A_{i+1}(x) \neq 0$ ，则称 $A$ 为论域 $X$ 上的双相基元组<sup>[7-9]</sup>。

给定双输入单输出模糊控制器的输入论域为 $X = [-E, E], Y = [-EC, EC]$ ，输出论域为 $Z = [-U, U]$ ，输入论域 $X, Y$ 和输出论域 $Z$ 对应的线性基元组分别为 $\{A_i\} (i=1, 2, \dots, n), \{B_j\} (j=1, 2, \dots, m), \{C_{ij}\} (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m)$ 。3组线性基元组隶属度函数峰点分别满足 $-E = x_1 < x_2 < \dots < x_n = E, -EC = y_1 < y_2 < \dots < y_m = EC$ 。 $X, Y$ 和 $Z$ 对应的变论域模糊因子分别为 $\alpha(x), \beta(x, y)$ 与 $\gamma(z)$ <sup>[10]</sup>。给定初始动态控制规则 $R(0)$ ，取 $x_i(0) = x_i, y_j(0) = y_j, z_{ij}(0) = z_{ij}$ 。隶属函数 $A_i(x(k), k) (i=2, 3, \dots, n-1)$ 和 $B_j(y(k), k) (j=2, 3, \dots, m-1)$ 定义为

$$B_m(y(k), k) = \begin{cases} 0 & (y_1(k) \leq y(k) \leq y_{m-1}(k)) \\ [y(k) - y_{m-1}(k)] / [y_m(k) - y_{m-1}(k)] & (y_{m-1} \leq y(k) \leq y_m(k)) \end{cases} \quad (10)$$

该控制器设计步骤如下:

1) 给定控制器的输入值为  $x(0) \in X, y(0) \in Y$ , 计算控制器的输出

$$z(1) = F(x(0), y(0), 0) = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q A_i(x(0), 0) B_j(y(0), 0) z_{ij}(0) \quad (11)$$

2) 被控目标在  $z(1)$  作用后输出控制参数, 该数值与参考输入值比较后可得模糊控制器的输入  $x(1), y(1)$ , 取  $x_i(1) = \alpha(x(1)) x_i(0), y_j(1) = \beta(x(1), y(1)) y_j(0)$ , 计算

$$z_{ij}(2) = F(x_i(1), y_j(1), 0) = \sum_{s=1}^p \sum_{t=1}^q A_s(x_i(1), 0) B_t(y_j(1), 0) z_{st}(0) \quad (12)$$

$$z(2) = F(x(1), y(1), 1) = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q A_i(x(1), 1) B_j(y(1), 1) z_{ij}(1) \quad (13)$$

3) 被控目标在  $z(k)$  作用后输出控制参数, 该输出数值与参考输入值比较后可得模糊控制器的输入  $x(k), y(k)$ , 取  $x_i(k) = \alpha(x(k)) \cdot x_i(0), y_j(k) = \beta(x(k), y(k)) y_j(0)$ , 计算

$$z_{ij}(k) = F(x_i(k), y_j(k), 0) = \sum_{s=1}^p \sum_{t=1}^q A_s(x_i(k), 0) B_t(y_j(k), 0) z_{st}(0) \quad (14)$$

$$z(k+1) = F(x(k), y(k), k) = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q A_i(x(k), k) B_j(y(k), k) z_{ij}(k) \quad (15)$$

定理 1

$$z(k+1) = \sum_{s=1}^p \sum_{t=1}^q \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q A_i(x(k)) / \alpha(x(k)) A_s(\alpha(x(k)) x_i(0)) \cdot B_j(y(k) / \beta(x(k), y(k)) y_j(0)) z_{st}(0) \quad (16)$$

此外, 当  $x(k) \rightarrow 0$  且  $y(k) \rightarrow 0$  时,  $z(k+1) \rightarrow 0$ 。

## 2.2 显遗传自适应模糊控制推广与验证

定理 1 推广: 若  $\forall k, |x(k)| \leq C_1 (C_1 \geq 0), |y(k)| \leq C_2 (C_2 \geq 0)$ , 则  $z(k+1)$  有界。

证明: 记  $E(0) \underline{\Delta} E, E(k) \underline{\Delta} \alpha(x(k)) E, (k=1, 2, \dots), X(k) \underline{\Delta} [-E(k), E(k)] (k=0, 1, \dots), M(k) \underline{\Delta} \sup\{|F(x, C_x, 0)| \mid x \in X(k)\} (k=0, 1, \dots, C_x$  为任意常数), 因为  $F(x, C_x, 0)$  在定义域  $[-E, 0) \cup (0, E]$  中为单调函数, 且当  $x_1 \in [-E, 0), x_2 \in (0, E]$  时,  $F(x_1, C_x, 0) \cdot F(x_2, C_x, 0) < 0$ , 所以  $F(0, C_x, 0) = 0$ 。当  $|x(k)| \leq C_1 (C_1 \geq 0)$  时,  $|M(k)| \leq C_3 (C_3 > 0)$ , 又  $x_i(k) \in X(k)$ , 所以

$$|F(x_i(k), C_x, 0)| \leq |M(k)|。$$

同理, 记  $EC(0) \underline{\Delta} EC, EC(k) \underline{\Delta} \beta(y(k)) \cdot EC, (k=1, 2, \dots), Y(k) \underline{\Delta} [-EC(k), EC(k)] (k=0, 1, \dots); N(k) \underline{\Delta} \sup\{|F(y, 0)| \mid y \in Y(k)\} (k=0, 1, \dots)$ 。因为  $F(y, C_y, 0)$  在定义域  $[-EC, 0) \cup (0, EC]$  中为单调函数, 且当  $y_1 \in [-EC, 0), y_2 \in (0, EC]$  时,  $F(y_1, C_y, 0) \cdot F(y_2, C_y, 0) < 0$ , 所以  $F(0, C_y, 0) = 0$ 。当  $|x(k)| \leq C_2 (C_2 \geq 0)$  时,  $|N(k)| \leq C_4 (C_4 > 0)$ , 又  $y_j(k) \in Y(y)$ , 所以  $|F(y_j(k), C_y, 0)| \leq |N(k)|$ , 综上可得

$$|z(k+1)| = \left| \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q A_i(x(k), k) B_j(y(k), k) z_{ij}(k) \right| \cdot \max_{ij} \{|z_{ij}(k)|\} = \max_{ij} \{|F(x_i(k), y_j(k), 0)|\} \leq M(k)N(k) \leq C \quad (17)$$

式(17)证明了定理 1 的推论, 将显遗传自适应模糊控制输入变量的范围限制条件由原始的收敛函数扩大到有界函数, 扩大了其使用范围, 在城轨列车悬挂系统控制中, 输入量均为有界变量<sup>[11]</sup>, 故针对悬挂模型可采用显遗传自适应模糊控制方法。

在双输入单输出问题中, 给定两个输入论域均为  $X = [-E, E], Y = [-D, D], Z = [-U, U]$  为单输出论域。在多数情况下, 输入论域  $X$  与  $Y$  之间相互影响, 在列车悬挂系统中  $X$  为误差论域,  $Y$  为误差变化率论域, 此时论域最值为  $D = EC$ , 即  $Y = [-EC, EC]$ , 论域  $X$  的伸缩因子为

$$\alpha(x) = \left(\frac{|x|}{E}\right)^{\tau_1} \quad (18)$$

其中:  $0 < \tau_1 < 1$ 。

论域  $Y$  的伸缩因子为

$$\beta(y) = \left(\frac{|y|}{EC}\right)^{\tau_2} \quad (19)$$

其中:  $0 < \tau_2 < 1$ 。

论域  $Z$  的伸缩因子定义在  $X \times Y$  上, 即

$$\gamma(z) = \gamma(x, y) = \frac{1}{2} \left[ \left(\frac{|x|}{E}\right)^{\tau_1} + \left(\frac{|y|}{EC}\right)^{\tau_2} \right] \quad (20)$$

其中:  $0 < \tau_1 < 1; 0 < \tau_2 < 1$ 。

## 2.3 显遗传自适应模糊控制规则设计

将显遗传自适应模糊控制运用在城轨列车悬挂模型中, 确定两个输入参数分别为列车横向总速度和列车横向加速度, 输出值为可控阻尼的控制电流值<sup>[12-15]</sup>。在该系统中, 城轨列车横向总速度与列车横向加速度为有界函数。由以上证明可知, 输出控制电流值为有界函数。系统的输入横向总速度  $X$ 、

横向加速度  $Y$  及电流输出量  $Z$  的模糊集均为  $[PB, PM, PS, ZO, NS, NM, NB]^{[16]}$ ;  $X, Y$  论域均为  $[-3.0, 3.0]$ , 对应峰值点为  $[-3.0, -2.0, -1.0, 0, 1.0, 2.0, 3.0]$ ;  $Z$  论域为  $[0, 3.0]$ , 对应峰值点为  $[0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0]$ 。  $X, Y$  伸缩因子选择  $\alpha(x) = \left(\frac{|x|}{E}\right)^{\tau_1}$ ,  $\beta(y) = \left(\frac{|y|}{EC}\right)^{\tau_2}$ ,  $Z$  伸缩因子选择  $\gamma(z) = \gamma(x, y) = \frac{1}{2} \left[ \left(\frac{|x|}{E}\right)^{\tau_1} + \left(\frac{|y|}{EC}\right)^{\tau_2} \right]$ 。隶属度函数选三角函数, 根据式(10), 通过 Matlab 编写显遗传自适应模糊控制算法<sup>[17]</sup>。依据专家控制经验, 在普通模糊控制基础上对模糊控制进行优化, 得到模糊控制规则表如表 1 所示。

表 1 模糊控制规则表  
Tab. 1 Fuzzy control rules

Y	X						
	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB
PB	PB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO
PM	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	NS
PS	PB	PM	PM	PS	ZO	NS	NM
ZO	PM	PM	PS	PS	NS	NM	NM
NS	PM	PS	ZO	ZO	NM	NM	NM
NM	NS	NS	NM	NM	NB	NB	NB
NB	NS	NS	NM	NM	NB	NB	NB

### 3 仿真分析

在 Matlab 环境下, 根据表 1 设计控制器, 以德国轨道低干扰谱作为轨道不平顺输入, 列车速度为 80 km/h, 仿真时间为 10s, 仿真步长为 0.1, 控制器控制步长为 0.1。以各振动加速度值以及人体敏感频率附近功率谱密度函数最小为最优, 对不同模糊控制方法的控制效果进行对比分析。

#### 3.1 加速度分析

通过实验获取横向合成加速度、车体横移加速度、侧滚加速度及摇头加速度图像, 如图 2~5 所示。

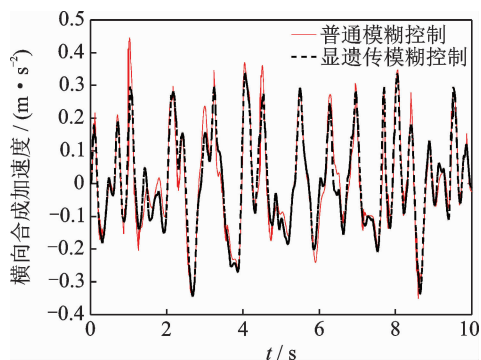


图 2 横向合成加速度

Fig. 2 Transverse resultant acceleration

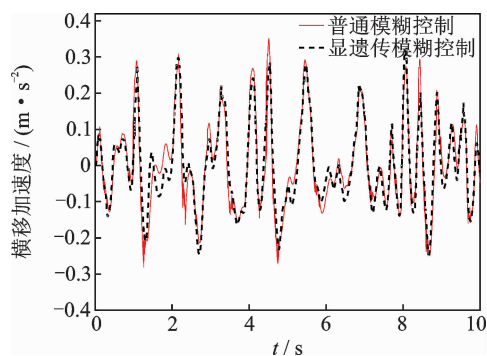


图 3 横移加速度

Fig. 3 Traverse acceleration

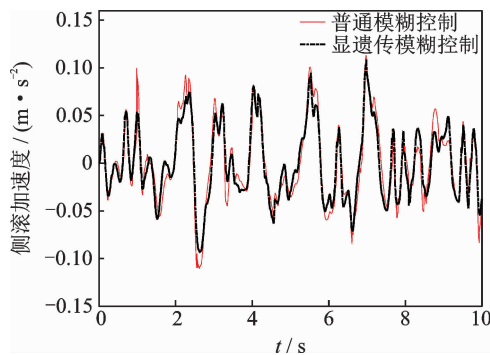


图 4 侧滚加速度

Fig. 4 Rolling acceleration

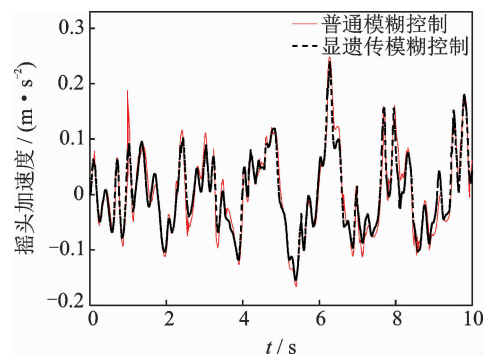


图 5 摇头加速度

Fig. 5 Shaking head acceleration

由图 2~5 可知, 在城轨列车悬挂系统控制中, 与普通模糊控制相比, 采用显遗传自适应模糊控制时, 各类加速度最大值均明显降低。

表 2 为不同控制方式下的 4 种振动加速度最大值对比。由表 2 可知, 采用显遗传自适应模糊控制时, 系统横向合成加速度、车体横移加速度、侧滚加速度及摇头加速度最大值相对于普通模糊控制分别优化 10.98%, 3.23%, 8.18% 和 20.33%。表 3 为车体振动加速度均方根值对比。与普通模糊控制进行对比, 各项指标均有不同幅度的降低, 加速度均方根值分别降低 4.25%, 8.60%, 8.37% 和 4.52%, 车

辆运行稳定性得到提高。运用显遗传自适应模糊控制器进行控制,可有效抑制列车悬挂系统振动,进而提高乘客舒适感。

表 2 车体振动加速度最大值对比

Tab. 2 Comparison table of the maximum vibration acceleration of the body

振动类型	控制方式		优化结果/ %
	显遗传自适应	普通模糊	
	模糊控制/ (m · s <sup>-2</sup> )	控制/ (m · s <sup>-2</sup> )	
横向合成	0.368 2	0.413 6	10.98
横移	0.240 1	0.248 1	3.23
侧滚	0.113 4	0.123 5	8.18
摇头	0.357 0	0.448 1	20.33

表 3 车体振动加速度均方根值对比

Tab. 3 Comparison table of rms value of vehicle body vibration acceleration

振动类型	控制方式		优化结果/ %
	显遗传自适应	普通模糊	
	模糊控制/ (m · s <sup>-2</sup> )	控制/ (m · s <sup>-2</sup> )	
横向合成	0.145 6	0.152 2	4.25
横移	0.068 0	0.074 4	8.60
侧滚	0.038 3	0.041 8	8.37
摇头	0.114 0	0.119 4	4.52

### 3.2 功率谱密度函数分析

列车横向振动的物理量转化为数值,用速度变化率来表示,速度变化率信号设为  $F(t)$ , 范围取值为  $-\infty < t < +\infty$ , 与狄氏定理相符,存在  $\int_{-\infty}^{+\infty} F(t)dt < \infty$ , 说明有界,对  $F(t)$  进行傅里叶变换<sup>[18]</sup>,即

$$F(W) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(t)e^{-j\omega t} dt \quad (21)$$

加速度信号  $F(t)$  的总量趋于无穷,经计算可知,对功率取平均值为有界数值<sup>[19]</sup>,即

$$W = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T F^2(t)dt < \infty \quad (22)$$

由式(21)和式(22)可得

$$W = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} F^2(W)dt \quad (23)$$

加速度  $F(t)$  的功率谱密度函数  $G(\omega)$  为

$$G(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} F^2(W) \quad (24)$$

城轨车辆运行的速度设为 80 km/h,4 种振动形式下的加速度功率谱密度函数图形分别如图 6~9 所示。人体敏感频率为 10 Hz 以下低频段<sup>[20]</sup>,由

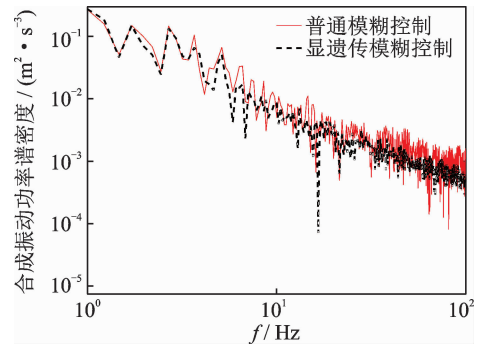


图 6 合成振动功率谱密度曲线

Fig. 6 Power spectral density curve of synthetic vibration

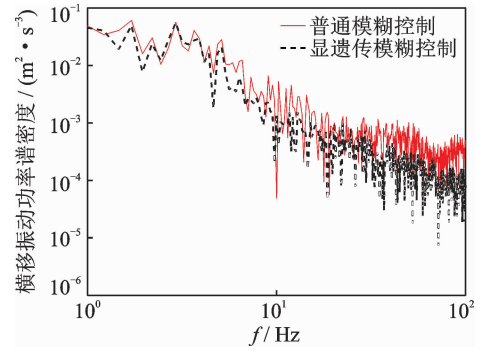


图 7 横移振动功率谱密度曲线

Fig. 7 Power spectral density curve of traverse vibration

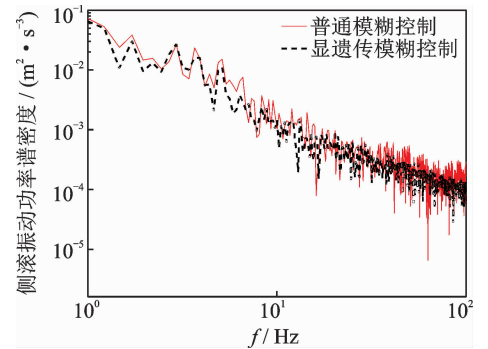


图 8 侧滚振动功率谱密度曲线

Fig. 8 Power spectral density curve of roll vibration

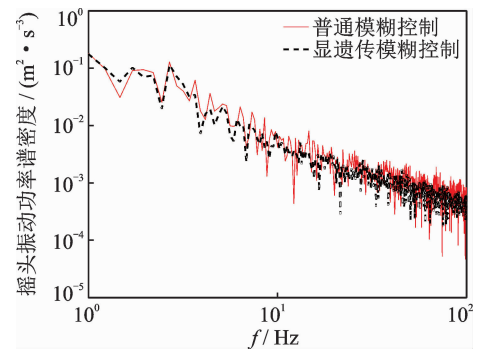


图 9 摇头振动功率谱密度曲线

Fig. 9 Power spectral density curve of shaking head vibration

图 6~9 可知:在 1 Hz 附近的功率谱密度取到极值,

显遗传自适应模糊控制系统各项加速度的功率谱密度数值远低于普通模糊控制系统。加速度功率谱密度最大值对比及均方根值对比如表4,5所示。

表4 加速度功率谱密度最大值对比

Tab.4 Comparison table of maximum rms value of acceleration

振动类型	控制方式		优化结果/ %
	显遗传自适应 模糊控制/ ( $m \cdot s^{-2}$ )	普通模糊 控制/ ( $m \cdot s^{-2}$ )	
	横向合成	0.284 5	
横移	0.061 3	0.077 3	20.70
侧滚	0.066 8	0.078 6	15.01
摇头	0.188 6	0.285 6	33.96

表5 加速度功率谱密度均方根值对比

Tab.5 Comparison table of rms value of acceleration power spectral density

振动类型	控制方式		优化结果/ %
	显遗传自适应 模糊控制/ ( $mm \cdot s^{-2}$ )	普通模糊 控制/ ( $mm \cdot s^{-2}$ )	
	横向合成	0.461 4	
横移	0.254 1	0.322 5	21.21
侧滚	0.216 3	0.247 6	12.64
摇头	0.399 3	0.444 3	10.13

显遗传自适应模糊控制最大值远低于普通调控,横向合成振动、横移振动、侧滚振动及摇头振动加速度功率谱密度最大值分别降低了30.34%,20.70%,15.01%和33.96%,均方根值分别降低了14.13%,21.21%,12.64%和10.13%。仿真结果表明,该控制方法能够有效抑制城轨车辆横向振动,提高乘客舒适度。

## 4 结论

1) 城轨列车悬挂系统中输入量均为有界变量,经推导,显遗传自适应模糊控制的输入变量可扩大到有界函数,并已做出相关证明,故该方法适用于悬挂系统模型控制中。

2) 通过仿真实验对比分析显遗传自适应模糊控制与普通模糊控制的调控效果,结果表明,采用显遗传自适应模糊控制方法,城轨列车悬挂系统模型横向合成加速度、横移振动加速度、侧滚振动加速度以及摇头振动加速度的最大值、均方根值均出现不同幅度的降低,最大值分别优化10.98%,3.23%,8.18%和20.33%,加速度均方根值分别降低4.25%,8.60%,8.37%和4.52%。

3) 通过功率谱密度函数对比分析各控制方法的控制效果可见,显遗传自适应模糊控制使横向合成振动、横移振动、侧滚振动及摇头振动加速度功率谱密度最大值分别降低30.34%,20.70%,15.01%和33.96%,均方根值分别降低14.13%,21.21%,12.64%和10.13%,该方法表现出较强的控制能力,故对城轨列车悬挂系统横向振动的抑制效果优于普通模糊控制。

4) 在人体敏感频率附近,显遗传自适应模糊控制系统各项加速度的功率谱密度数值远低于普通模糊控制系统,这验证了该方法具有较好的稳定性,充分提高了乘车舒适度,为城轨列车进一步提速提供了良好基础。

## 参 考 文 献

- [1] 周洪涛,杨绍普,朱红霞. 基于模糊控制的高速机车横向半主动控制研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(9): 145-149.  
ZHOU Hongtao, YANG Shaopu, ZHU Hongxia. Fuzzy control strategy applied in lateral semi-active control of the high-speed locomotive [J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(9): 145-149. (in Chinese)
- [2] 丁畅,钟睦,杨明智,等. 车体侧滚对列车气动性能和运行稳定性的影响[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(2): 466-473.  
DING Chang, ZHONG Mu, YANG Mingzhi, et al. Effect of train body roll on moving stability aerodynamic performance and of high-speed train [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(2): 466-473. (in Chinese)
- [3] 李洪兴. 变论域自适应模糊控制器[J]. 中国科学: E辑, 1999, 29(1): 32-42.  
LI Hongxing. Adaptive fuzzy control of variable universe [J]. Science in China: Series E, 1999, 29(1): 32-42. (in Chinese)
- [4] 付娜,李成辉,赵振航,等. 车辆-轨道藕合作用下桥上减振双块式无砟轨道减振性能研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(5): 1095-1102.  
FU Na, LI Chenghui, ZHAO Zhenhang, et al. Study on the vibration reduction performance of double-block ballastless damping track on bridge under vehicle-track coupling effect [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(5): 1095-1102. (in Chinese)
- [5] Jakob H, Thomas S. Influence of unsteady aerodynamics on driving dynamics of passenger cars [J]. Vehicle System Dynamics, 2014, 52(11): 1470-1488.

- [6] 周洪涛,朱红霞. 高速动车组半主动悬挂系统几种控制策略对比仿真分析[J]. 铁道机车车辆, 2011, 31(1): 4-9.  
ZHOU Hongtao, ZHU Hongxia. Comparison of several semi-active control strategies in suspension system of high-speed EMUS [J]. Railway Locomotive & Car, 2011, 31(1): 4-9. (in Chinese)
- [7] 杨昕时. 悬挂式单轨列车动力学及关键参数关键工况分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [8] 徐金辉. 高速车辆-轨道耦合系统随机振动分析及轨道不平顺评价方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [9] 龙祖强,梁昔明,游开明. 双输入单输出遗传变论域模糊控制算法及其收敛性[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(4): 683-687.  
LONG Zuqiang, LIANG Ximing, YOU Kaiming. Double-input and single-output fuzzy control algorithm with potentially-inherited variable universe and its convergence [J]. Control Theory and Applications, 2008, 25(4): 683-687. (in Chinese)
- [10] 翟兴辉,肖刚,罗亚军,等. 环形天线结构的振动主动控制[J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(6): 1148-1154.  
ZHAI Xinghui, XIAO Gang, LUO Yajun, et al. Research on active vibration control of loop antenna structure [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2018, 38(6): 1148-1154. (in Chinese)
- [11] 于曰伟,周长城,赵雷雷. 高速列车转向架-车体-座椅垂向耦合振动机理及悬挂参数联合优化[J]. 机械工程学报, 2018, 54(8): 57-67.  
YU Yuewei, ZHOU Changcheng, ZHAO Leilei. Vertical coupled vibration mechanism of bogie-body-seat system and joint optimization of suspension parameters for high-speed train [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(8): 57-67. (in Chinese)
- [12] 周长城,于曰伟,赵雷雷. 高速列车二系垂向悬挂系统设计解析表达式[J]. 机械工程学报, 2016, 52(19): 53-60.  
ZHOU Changcheng, YU Yuewei, ZHAO Leilei. Analytical formulae of secondary vertical suspension system design for high-speed train [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(19): 53-60. (in Chinese)
- [13] HU X M, LI W L. Research on the fuzzy control for vehicle semi-active suspension [J]. Advanced Materials Research, 2013, 683: 716-719.
- [14] FAN L P, WANG H L, CHONG L I. Adaptive fuzzy control based on variable universe for microbial fuel cell [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2016, 40(2): 313-315.
- [15] ZHANG Y W, ZHAO Y, ZHANG Y H. Riding comfort optimization of railway trains based on pseudo-excitation method and symplectic method [J]. Journal of Sound and Vibration, 2013(21): 1-6.
- [16] 李宗刚,赵振乾,葛立明. 基于二阶一致性算法的多仿生机器鱼分布式编队控制[J]. 控制与决策, 2019, 34(1): 31-42.  
LI Zonggang, ZHAO Zhenqian, GE Liming. Distributed formation control of multiple biomimetic robotic fish based on second-order consensus algorithm [J]. Control and Decision, 2019, 34(1): 31-42. (in Chinese)
- [17] 周湛杰,王新生,王岩. 基于模糊自适应算法的航天器姿态控制[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(2): 124-129.  
ZHOU Zhanjie, WANG Xinsheng, WANG Yan. Spacecraft attitude control based on fuzzy adaptive algorithm [J]. Electric Machines and Control, 2019, 23(2): 124-129. (in Chinese)
- [18] SAVRAN A. A multivariable predictive fuzzy PID control system [J]. Applied Soft Computing, 2013, 13(5): 2658-2667.
- [19] JAKOB H, THOMAS S. Influence of unsteady aerodynamics on driving dynamics of passenger cars [J]. Vehicle System Dynamics, 2014, 52(11): 1470-1488.
- [20] 时培成,徐增伟,王锁. 变论域自适应模糊PID主动悬架控制研究[J]. 机械科学与技术, 2018, 12(2): 1-8.  
SHI Peicheng, XU Zengwei, WANG Suo. Research on the variable universe adaptive fuzzy PID control for active suspension [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2018, 12(2): 1-8. (in Chinese)



**第一作者简介:**车军,男,1962年1月生,高级工程师、硕士生导师。主要研究方向为机械装备自动化及检测技术。曾发表《电子束3D打印模糊PID温度控制系统》(《机械制造与自动化》2019年第41卷第2期)等论文。  
E-mail: chejun163@163.com

**通信作者简介:**韩壮,男,1994年9月生,硕士生。主要研究方向为机械装备自动化及检测技术。  
E-mail: 61987001@qq.com

