

文章编号 1004-924X(2013)12-3298-10

列车横向半主动悬挂系统变论域模糊控制

李广军^{1*}, 金炜东¹, 陈春俊²

(1. 西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031; 2. 西南交通大学 机械工程学院, 四川 成都 610031)

摘要:针对复杂的列车横向模型,设计了半主动悬挂变论域模糊控制器。介绍了变论域模糊控制的基本原理,推广了它的收敛条件,并证明其适用于列车横向悬挂系统。给出了 17 自由度的列车动力学模型,利用 Simulink 软件建立了列车横向模型。最后,以列车横向速度和加速度作为模糊控制器的输入变量,以阻尼器电流作为模糊控制器的输出变量,设计了潜遗传变论域模糊控制器,并进行了仿真实验。根据实验结果计算了列车横向加速度的最大值、均方根值和功率谱密度最大值,并对变论域模糊控制、普通的模糊控制和被动悬挂进行了对比。仿真结果表明:变论域模糊控制降低了列车横向加速度最大值、均方根值和功率谱密度最大值,控制结果好于普通的模糊控制和被动悬挂。

关键词:列车;横向半主动悬挂;被动悬挂;变论域模糊控制;加速度均方根值;功率谱密度函数

中图分类号:TP273.4;U270.11 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20132112.3298

Variable universe fuzzy control of train lateral semi-active suspension system

LI Guang-jun^{1*}, JIN Wei-dong¹, CHEN Chun-jun²

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

* Corresponding author, E-mail: xzs023@126.com

Abstract: A variable universe fuzzy controller was designed for the lateral semi-active suspension system of a train. The convergence condition of variable universe fuzzy was given more widely, which was confirmed to be suitable for the suspension system of train. Then, the lateral model of a 17-DOF vehicle was built by Simulink software based on the theory of dynamics. Finally, a potentially-inherited variable universe fuzzy controller was designed by taking the lateral acceleration and velocity of the suspension as the input variables of controller and the damper current as the output variable of controller. A simulation experiment was carried out at the same time, the max value, root mean square and power spectrum density function's max value of the lateral acceleration were calculated, and the results obtained from the variable universe fuzzy controller, traditional controller and the passive suspension were compared. The simulation results show that those data mentioned above have been decreased, which means that the control results by variable universe fuzzy control are better than those of conventional fuzzy control and passive suspension.

收稿日期:2013-06-08;修订日期:2013-07-01.

基金项目:国家自然科学基金重点项目(No. 61134002);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. SWJTU12CX038)

Key words: train; lateral semi-active suspension; passive suspension; variable universe fuzzy control; root mean square of acceleration; power spectrum density function

1 引言

列车高速运行时,轨道不平顺会使列车产生横向振动,在 1~2 Hz 频带内,该振动信号的能量均很大^[1],会影响列车的横向平稳性。列车多采用横向主动或者半主动悬挂来抑制横向振动,因为半主动悬挂的性能优于主动悬挂。目前,半主动悬挂的控制算法和策略已成为研究热点^[2-4]。理论上半主动悬挂包括 PID 控制、线性最优控制、鲁棒控制、神经网络控制等,而车辆悬挂系统的复杂性、非线性限制了很多算法的实际应用^[5]。由于模糊控制不需要精确的数学模型,具有人工智能的特点,而且算法易于实现,已被广泛应用到列车横向半主动悬挂控制系统中^[6-8]。

在列车横向半主动悬挂模糊控制中,普通的模糊控制不但精度低,而且控制规则和隶属度固定后很难修改^[6-7]。若想通过进化算法优化模糊控制规则,也只能进行离线优化,无法实现在线调整^[8]。为了解决上述问题,在不改变规则形式的前提下,文献[9]首次提出了变论域模糊方法,用以提高模糊控制精度,并给出了收敛条件。文献[10]给出了常用的潜遗传变论域模糊收敛性证明,进一步完善了变论域模糊理论体系。变论域模糊作为一种新的在线模糊控制调整方法,已经被应用于倒立摆控制、自动倒车等很多领域,也被应用于车辆悬挂控制系统中^[11-13]。文献[11]首次针对两自由度的汽车悬挂系统,提出了悬挂阻尼力变论域模糊控制算法,并取得了较好的控制效果。文献[12]进行了基于变论域模糊控制的汽车半主动悬挂实验。实验结果表明,变论域模糊控制的动载荷、车体垂向加速度等指标均好于普通的模糊控制和被动悬挂。而文献[13]针对两自由度装甲车,设计了变论域模糊控制器。仿真结果表明,该控制器可以有效地降低车辆振动加速度均方根值。

与汽车和装甲车相比,列车悬挂系统属于更复杂的非线性系统,其存在多耦合和多变量等因素。由于普通的模糊控制精度低,因此,列车悬挂系统也有必要采用半主动悬挂变论域模糊控制策略。但文献[9]给出的变论域模糊收敛的前提条件比较

苛刻,其要求模糊输入变量收敛极限必须为零,而很多工程情况很难满足该条件。为了方便工程应用,需要给出更广泛的变论域模糊收敛条件。本文推广了变论域模糊控制算法的收敛条件,使其更适应工程应用,并将该算法应用到列车横向半主动悬挂系统这一工程领域,以减少列车横向振动。

2 列车横向模型

为了研究减振效果,首先建立列车横向模型。以某辆车为例,其动力学模型如下^[6]:

$$M\ddot{\mathbf{X}} + C\dot{\mathbf{X}} + K\mathbf{X} = G\boldsymbol{\omega}, \quad (1)$$

$\mathbf{X} = \{y_{w1}, y_{w2}, y_{w3}, y_{w4}, \psi_{w1}, \psi_{w2}, \psi_{w3}, \psi_{w4}, y_{t1}, y_{t2}, \phi_{t1}, \phi_{t2}, \phi_{t1}, \phi_{t2}, y_c, \phi_c, \psi_c\}$, 其中: y_{wj} 和 ψ_{wj} ($j = 1, 2, 3, 4$) 分别为车轮的横移和摇头振动; y_{ti} 、 ϕ_{ti} 和 ψ_{ti} ($i = 1, 2$) 分别为转向架的横移、侧滚和摇头振动; y_c 、 ϕ_c 和 ψ_c 分别为车体的横移、侧滚和摇头振动,共 17 个自由度的变量。 M 、 C 、 K 分别为整车质量、阻尼和刚度矩阵; G 为轨道输入分布矩阵; $\boldsymbol{\omega}$ 为轨道不平顺输入(各矩阵参数详见文献[6])。轨道不平顺 $\boldsymbol{\omega}$ 使得车轮产生强迫振动 y_{wj} 和 ψ_{wj} , 进而使转向架产生 y_{ti} 、 ϕ_{ti} 和 ψ_{ti} 的振动,并把振动传至车体,最终使转向架和车体产生连续的 y_c 、 ϕ_c 和 ψ_c 振动,这些振动合成了车体横向加速度,严重影响列车的横向平稳性。为了便于检测列车横向振动加速度幅值,一般分别在车体两端的转向架处以及车体中间安装传感器,以检测车体相应位置的横向合成加速度(为了便于表达,根据运行方向,将列车分为前后 2 个方向转向架,简记为前后端)。在前后转向架处,将检测到的加速度信号分别送入控制器进行运算,并根据计算结果产生输出电流 i_i , 然后分别调整安装于前后转向架处的可调阻尼器阻尼 c , 使其与车体速度相互作用产生横向阻尼力,从而减少横向振动,提高横向平稳性。设 y_c 、 ϕ_c 和 ψ_c 的振动加速度分别为 a_{y_c} 、 a_{ϕ_c} 和 a_{ψ_c} , 前端、中间和后端横向加速度分别为 a_l 、 a_{mid} 和 a_r , 加速度合成关系如下:

$$a_l = a_{y_c} - a_{\phi_c} + a_{\psi_c}, \quad (2)$$

$$a_{mid} = a_{y_c} - a_{\phi_c}, \quad (3)$$

$$a_r = a_{y_c} - a_{\phi_c} - a_{\psi_c}. \quad (4)$$

3 变论域模糊控制原理

3.1 变论域模糊控制的基本原理

定义^[9-10]: 设 $\mathbf{A} = \{A_i\}$ ($1 \leq i \leq n, i, n \in \mathbf{N}$) 是论域集 \mathbf{X} 的一组模糊集, 且满足 $\sum_{i=1}^n A_i(x) = 1, x \in X, A_i$ 和 A_j 的峰值点分别为 x_i 和 x_j ($1 \leq j \leq n, j \in \mathbf{N}$), 当 $i \neq j$ 时, $x_i \neq x_j$, 则称 A_i 为 \mathbf{A} 的一个基元, 并称 \mathbf{A} 为 x 上的一个基元组。特别地, 对任意 $x \in \mathbf{X}$, 且 $x \neq x_i$, 若 $A_i(x) \neq 0$, 且 $A_{i+1}(x) \neq 0$ 并满足:

$$A_i(x) + A_{i+1}(x) = 1, \quad (5)$$

则称 \mathbf{A} 为 \mathbf{X} 上的双相基元组。若 $A_i(x)$ 为线性函数, 则称 \mathbf{A} 为 \mathbf{X} 上的双相线性基元组。

给定模糊控制器, 设 $\mathbf{X}_i = [-E_i, E_i]$ 是输入变量 x_i ($i=1, 2, \dots, p$, 且 $p \in \mathbf{N}$) 的论域; 而 $\mathbf{Z} = [-U, U]$ 是输出变量 z 的论域; $\mathbf{A}_j = \{A_{ij}\}$ ($j=1, 2, \dots, q$, 且 $q \in \mathbf{N}$) 是论域 \mathbf{X}_i 上的一个基元组; $\mathbf{C} = \{C_j\}$ 是论域 \mathbf{Z} 上的一个基元组, 若 \mathbf{A} 和 \mathbf{C} 表示模糊语言变量, 并采用以下规则:

If x_1 is A_{1j} , and x_2 is A_{2j} , and \dots , and x_n is A_{pj} , then z is C_j . (6)

设 \mathbf{X}_{ij} 为 A_{ij} 的峰点, \mathbf{Z}_j 为 C_j 的峰点, 则模糊控制系统可以表示成为一个 p 元插值函数:

$$z(x_1, x_2, \dots, x_n) = \sum_{j=1}^q \prod_{i=1}^p A_{ij}(x_i) z_j. \quad (7)$$

特别地, 针对一个双输入单输出的模糊控制器, 该控制器的映射函数 $f(x, y)$ 的逼近函数为 $F(x, y)$, 若 \mathbf{A} 和 \mathbf{B} 分别为控制器输入论域的线性基元组, 则该控制器可以近似表示为二元插值函数形式:

$$z = F(x, y) = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q A_i(x) B_j(y) z_{ij}, \quad (8)$$

$$A_1(x(k), k) = \begin{cases} [x(k) - x_2(k)] / [x_1(k) - x_2(k)], & x_1(k) \leq x(k) \leq x_2(k) \\ 0, & x_2(k) \leq x(k) \leq x_n(k) \end{cases}, \quad (14)$$

$$A_i(x(k), k) = \begin{cases} [x(k) - x_{i-1}(k)] / [x_i(k) - x_{i-1}(k)], & x_{i-1}(k) \leq x(k) \leq x_i(k) \\ [x(k) - x_{i+1}(k)] / [x_i(k) - x_{i+1}(k)], & x_i(k) \leq x(k) \leq x_{i+1}(k), \\ 0, & \text{其他} \end{cases}, \quad (15)$$

$$A_n(x(k), k) = \begin{cases} 0, & x_1(k) \leq x(k) \leq x_{n-1}(k) \\ [x(k) - x_{n-1}(k)] / [x_n(k) - x_{n-1}(k)], & x_{n-1}(k) \leq x(k) \leq x_n(k) \end{cases}, \quad (16)$$

变化后的论域可以表示为:

$$\mathbf{X}_i = [-\alpha(x_i)E_i, \alpha(x_i)E_i], \quad (9)$$

$$\mathbf{Z} = [-\gamma(z)U, \gamma(z)U], \quad (10)$$

其中: $\alpha(x_i), \gamma(z)$ 称为论域的伸缩因子; \mathbf{X}_i 与 \mathbf{Z} 称为初始论域; 则变论域模糊控制可表示成 p 元动态插值函数:

$$z(x(t+1)) = \gamma(z(x(t))) \sum_{j=1}^q \prod_{i=1}^p A_{ij} \left[\frac{x_i(t)}{\alpha(x_i(t))} \right] z_j, \quad (11)$$

其中: $x(t) = x_i(t)$ ($i=1, 2, \dots, p$)。常见的变论域模糊因子有以下两种:

$$\alpha(x_i) = 1 - \lambda \exp(-kx_i^2), \quad (12)$$

$$\alpha(x_i) = \left(\frac{\|x_i\|}{E_i} \right)^\tau, \quad (13)$$

其中: $0 < \lambda, \tau < 1$, 为常数, 而 k 是大于零的常数。变论域模糊控制算法有潜遗传、显遗传和逐步显遗传三种。潜遗传算法具有算法简单, 易于实现的特点, 已被学者和工程技术人员广泛采用。文中列车横向半主动悬挂采用双输入单输出的潜遗传变论域模糊控制算法。文中还将重点讨论该算法及其收敛性。

3.2 双输入单输出潜遗传变论域模糊控制

针对双输入单输出的模糊控制器, 输入论域为 $\mathbf{X} = [-E, E]$ 和 $\mathbf{Y} = [-E_c, E_c]$, 输出论域为 $\mathbf{Z} = [-U, U]$ 。 $\{A_i\}$ ($i=1, 2, \dots, n$), $\{B_j\}$ ($j=1, 2, \dots, m$), $\{C_j\}$ ($i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, m$) 分别为 \mathbf{X}, \mathbf{Y} 和 \mathbf{Z} 上的线性基元组, 其隶属度函数的峰点分别满足 $-E = x_1 < x_2 < \dots < x_m = E$, $-E_c = y_1 < y_2 < \dots < y_m = E_c$, $-U = z_{11} < z_{12} < \dots < z_{mm} = U$; \mathbf{X}, \mathbf{Y} 和 \mathbf{Z} 所对应的变论域模糊因子分别为 $\alpha(x), \beta(x, y)$ 和 $\gamma(z)$ 。给定初始规则 $R(0)$, 即取 $x_i(0) = x_i, y_j(0) = y_j$ 和 $z_{ij}(0) = z_{ij}$ 。隶属函数 $A_i(x(k), k)$ ($i=2, 3, \dots, n-1$) 和 $B_j(y(k), k)$ ($j=2, 3, \dots, m-1$) 定义分别如下:

$$\mathbf{B}_1(y(k), k) = \begin{cases} [y(k) - y_2(k)]/[y_1(k) - y_2(k)], y_1(k) \leq y(k) \leq y_2(k) \\ 0, y_2(k) \leq y(k) \leq y_m(k) \end{cases}, \quad (17)$$

$$\mathbf{B}_j(y(k), k) = \begin{cases} [y(k) - y_{j-1}(k)]/[y_j(k) - y_{j-1}(k)], y_{j-1}(k) \leq y(k) \leq y_j(k) \\ [y(k) - y_{j+1}(k)]/[y_j(k) - y_{j+1}(k)], y_j(k) \leq y(k) \leq y_{j+1}(k), \\ 0, \text{其他} \end{cases}, \quad (18)$$

$$\mathbf{B}_m(y(k), k) = \begin{cases} 0, y_1(k) \leq y(k) \leq y_{m-1}(k) \\ [y(k) - y_{m-1}(k)]/[y_m(k) - y_{m-1}(k)], y_{m-1}(k) \leq y(k) \leq y_m(k) \end{cases}. \quad (19)$$

双输入单输出潜遗传变论域控制算法步骤如下^[9-10]:

步骤 1:任意给定控制器的初始输入 $x(0) \in \mathbf{X}, y(0) \in \mathbf{Y}$, 计算控制器输出 $z(1)$:

$$z(1) = F(x(0), y(0), 0) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \mathbf{A}_i(x(0), 0) \mathbf{B}_j(y(0), 0) z_{ij}(0). \quad (20)$$

步骤 2: $z(1)$ 作用于对象后产生系统输出,该输出与参考信号比较后得控制器的输入 $x(1)$ 和 $y(1)$,取 $x_i(1) = \alpha(x(1))x_i(0), y_j(1) = \beta(x(1), y(1))y_j(0)$, 计算 $z_{ij}(2)$ 和 $z(2)$:

$$z_{ij}(2) = F(x_i(1), y_j(1), 0) = \sum_{s=1}^n \sum_{t=1}^m \mathbf{A}_s(x_i(1), 0) \mathbf{B}_t(y_j(1), 0) z_{st}(0), \quad (21)$$

$$z(2) = F(x(1), y(1), 1) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \mathbf{A}_i(x(1), 1) \mathbf{B}_j(y(1), 1) z_{ij}(1). \quad (22)$$

步骤 $k-1$: $z(k)$ 作用于对象后产生系统输出,该输出与参考信号比较后得控制器的输入 $x(k)$ 和 $y(k)$,取 $x_i(k) = \alpha(x(k))x_i(0), y_j(k) = \beta(x(k), y(k))y_j(0)$, 计算 $z_{ij}(k+1)$ 和 $z(k+1)$:

$$z_{ij}(k+1) = F(x_i(k), y_j(k), 0) = \sum_{s=1}^n \sum_{t=1}^m \mathbf{A}_s(x_i(k), 0) \mathbf{B}_t(y_j(k), 0) z_{st}(0), \quad (23)$$

$$z(k+1) = F(x(k), y(k), k) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \mathbf{A}_i(x(k), k) \mathbf{B}_j(y_j(k), k) z_{ij}(k). \quad (24)$$

引理 1:双输入单输出潜遗传变论域模糊控制算法可以表示为:

$$z(k+1) = \gamma(z(k)F(x(k)/\alpha(x(k)), y(k)/\beta(x(k), y(k))) = \gamma(z) \sum_{i=1}^n \mathbf{A}_i(x(k)/\alpha(x(k))) \mathbf{B}_j(y(k)/(\beta(x(k), y(k)))) z_{ij}^0, \quad (25)$$

证明略, 详见文献[9-10]。

引理 2:若 $\forall k, x(k) \neq 0$, 且有 $\lim_{k \rightarrow +\infty} x(k) = 0$,

同时满足 $\lim_{k \rightarrow +\infty} \frac{\alpha(x(k-1))}{\alpha(x(k))} = 1$ 和 $\lim_{k \rightarrow +\infty} \frac{\gamma(z(k))}{\gamma(z(k-1))} = 1$, 则 $z(k+1)$ 必随 $x(k) \rightarrow 0$ 而收敛。特别地, 若 $x(k)$ 是 $\alpha(x(k-1))$ 的高阶无穷小, 则 $z(k+1)$ 必随 $x(k) \rightarrow 0$ 而收敛到零。证明略, 详见文献[9-10]。引理 2 指出变论域模糊控制输入 $x(k)$ 必须收敛为零, 而很多实际的工程情况很难满足要求。为了适合工程需要, 需要讨论变论域模糊更广泛的收敛条件, 下面以引理 2 推论形式给出。

推论:若 $\forall k, x(k) \neq 0, |x(k)| \leq M$ (M 为非负数), 且满足 $\lim_{k \rightarrow +\infty} \frac{\alpha(x(k-1))}{\alpha(x(k))} = 1$ 和 $\lim_{k \rightarrow +\infty} \frac{\gamma(z(k))}{\gamma(z(k-1))} = 1$, 则 $z(k+1)$ 必收敛, 并有界。

证明:根据文献[9-10], 由公式(25)可得:
 $F(x(k), y(k), k) = F(x(k)\alpha(x(k-1)))/\alpha(k),$
 $y(k)\beta(x(k-1), y(k-1))/\beta(x(k), y(k)), k-1)$
 $\gamma z(k)/\gamma(z(k-1)), \quad (26)$

$$|z(k) - z(k-1)| = |F(x(k), y(k), k) - F(x(k-1), y(k-1), k-1)| = |F(x(k), y(k), k) + F(x(k), y(k), k-1) + F(x(k), y(k), k-1) - F(x(k-1), y(k-1), k-1)| \leq |F(x(k), y(k), k) - F(x(k), y(k), k-1)| + |F(x(k), y(k), k-1) - F(x(k-1), y(k-1), k-1)|$$

$F(x, y, k-1)$ 是连续函数, $\forall \epsilon > 0, \exists \delta_1 > 0, \exists \delta_2 > 0$, 当 $|x(k) - x(k-1)| < \delta_1, |y(k) - y(k-1)| < \delta_2$ 时, 可得:

$$|F(x(k), y(k), k-1) - F(x(k-1), y(k-1), k-1)| < \epsilon/2, \quad (27)$$

令 $\rho = F(x(k)\alpha(x(k-1)))/\alpha(x(k)), y(k)\beta(x(k-1), y(k-1))/\beta(x(k), y(k)), k-1)$, 由式(27)可得:

$$|F(x(k), y(k), k) - F(x(k), y(k), k-1)| = |\gamma(z(k))\rho/\gamma(z(k-1)) - \rho| \leq |\gamma(z(k))/\gamma(z(k-1)) - 1|$$

$$1) - 1| |\rho| + |\rho - F(x(k), y(k), k-1)|$$

设 L 是 $F(x, y, k-1)$ 的上界, 则:

$$|F(x(k), y(k), k) - F(x(k), y(k), k-1)| \leq |\gamma(z(k))/\gamma(z(k-1)) - 1| L + |\rho - F(x(k), y(k), k-1)|$$

由引理 2 可知, $\exists K_1$ 当 $k > K_1$ 时, 有:

$$|\gamma(z(k))/\gamma(z(k-1)) - 1| L \leq \epsilon/4, \quad (28)$$

由引理 2 可知, $\exists K_2$, 当 $k > K_2$ 时, $|\alpha(x(k-1))/\alpha(x(k)) - 1| < \frac{\delta_2}{M}$, 又因 $|x(k)| \leq M$, 则必有 $|x(k) \parallel \alpha(x(k-1))/\alpha(x(k)) - 1| < \delta_2$, 则必有:

$$|\rho - F(x(k), y(k), k-1)| < \epsilon/4, \quad (29)$$

并取 $K = \max(K_1, K_2)$, 当 $k \geq K$ 时, 有:

$$|z(k+1) - z(k)| < \epsilon/2 + \epsilon/4 + \epsilon/4 = \epsilon. \quad (30)$$

式(30)证明了引理(2)的推论。很多工程技术问题, 输入变量 $x(k)$ 一般都是有界的, 若 $|x(k)| \leq M$, 则 $z(k)$ 收敛, 并且有界, 从而进一步扩大了变论域模糊的应用范围。

4 列车横向半主动悬挂变论域模糊控制研究

4.1 变论域模糊控制器设计

在车体转向架处, 取其横向合成速度 v 和加速度 a 为模糊控制器的输入变量, 模糊输出变量 i_1 为可调阻尼器的输入电流。由于 v 和 a 都是有上界的, 由引理(2)推论可知, 若采用基于潜遗传变论域模糊控制算法, 则输出变量 i_1 是收敛的。设变论域模糊控制器实际输入变量 a_1 和 a_2 , 其论域分别为 $[-1.5, 1.5] \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $[-1.5, 1.5] \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, 语言变量取 $\{\text{NB}, \text{NM}, \text{NS}, \text{ZO}, \text{PS}, \text{PM}, \text{PB}\}$, 对应的峰点值为 $[-1.5, -1.0, -0.5, 0, 0.5, 1.0, 1.5]$ 。输出变量为 b , 其所对应的论域为 $[0, 1.4] \text{ A}$, 语言变量 $\{\text{NB}, \text{NM}, \text{NS}, \text{ZO}, \text{PS}, \text{PM}, \text{PB}, \text{MB}\}$, 对应的线性基元峰点为 $[0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2, 1.4]$ 。各比例因子如下:

$$k_v = a_1/v = 10, \quad (31)$$

$$k_a = a_2/a = 2, \quad (32)$$

$$k_i = b/i_1 = 1. \quad (33)$$

a_1, a_2 和 b 分别采用如下的伸缩因子:

$$\alpha(a_1) = 1 - 0.3 \exp(-0.2 \times a_1^2), \quad (34)$$

$$\alpha(a_2) = (1 - 0.3 \exp(-0.2 \times a_2^2)) \times 0.5 + 0.5 \times \alpha(a_1), \quad (35)$$

$$\alpha(b) = 1 - 0.1 \exp(-0.2 \times b^2). \quad (36)$$

隶属度函数均采用三角函数, 利用 Matlab 函数根据公式(24)编写变论域模糊控制算法。根据经验, 得到如下的控制规则:

表 1 半主动悬挂变论域模糊控制规则

Tab. 1 Fuzzy control rules of variable universe of semi-active suspension

b	a_1						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
a_2	NB	NB	NB	NM	NS	NS	ZO
	NM	NB	NM	NM	NS	NS	ZO
	NS	NM	NM	NS	NS	ZO	PS
	ZO	NM	NS	ZO	ZO	PS	PS
	PS	NS	ZO	PS	PS	PM	PM
	PM	ZO	PS	PS	PM	PM	PB
	PB	PS	PM	PM	PM	PB	PB

4.2 列车横向动力学建模及控制器设计

根据列车横向动力学模型, 在 Simulink 中建立仿真模型, 如图 1 所示。该模型由车辆模型、轨道不平顺输入、控制器、数据输入和输出处理等模块组成。轨道不平顺输入模块用于模拟不平顺输入信号, 模拟数据储存于数据文件中。数据输入模块将轨道不平顺输入模块所产生的模拟数据输入到工作空间, 然后输入到包含了轮对、转向架和车体等组成部分的车辆模型中, 并在车体上产生各振动信号数据。数据输出模块则将各信号通过工作空间输出到数据文件。控制器模块是核心部件, 它包括控制器和可调阻尼器模型。

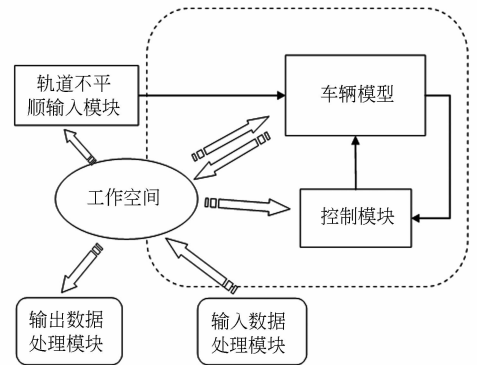


图 1 车辆横向模型

Fig. 1 Vehicle lateral model

根据变论域模糊控制算法,设计了控制器。控制器的输出电流 i_1 即为可调阻尼器线圈电流的输入电流。其中: i_1 与阻尼 c (单位: $\text{kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$) 的关系如下所示^[6]:

$$c = 54.3687 \times i_1^3 - 65.2278 \times i_1^2 + 29.9317 \times i_1 + 2.4747, \quad (37)$$

由公式 (37) 可知,若 $i_1 = 0$,则 c 为常数 $2.4747 \text{ kN} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$,这时,悬挂系统将从半主动悬挂变为定阻尼的被动悬挂。

5 仿真实验

轨道不平顺输入采用低干扰德国轨道激扰谱,列车时速为 $270 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,仿真时间为 25 s ,在 MATLAB 7.0 软件下进行分析,并对比分析了 几种控制算法的控制效果,实线、虚线和点划线分别代表变论域模糊控制、普通模糊控制和被动悬挂。列车横移、侧滚和摇头振动分别如图 2(a)、

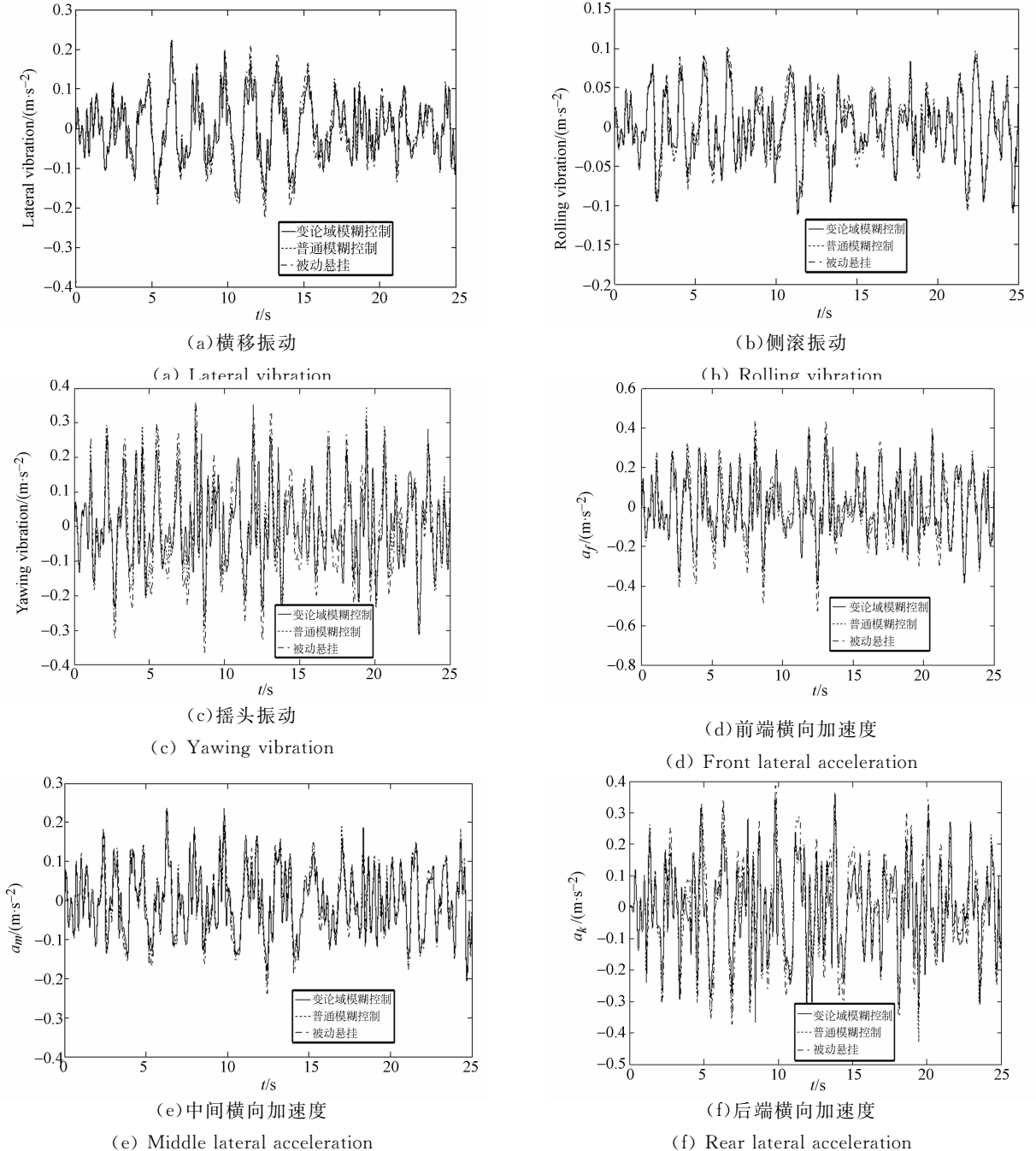


图 2 加速度最大值对比

Fig. 2 Comparison of maximum values of acceleration

2(b)和2(c)所示,前端、中间和后端的横向加速度分别如图2(e)、2(d)和2(f)所示。由图2可知,基于变论域模糊控制的列车横向半主动悬挂的加速度峰值已经明显减少。几种算法的加速度最大值对比结果如表2所示,从表2可知,变论域模糊控制横移、侧滚、摇头、前端、中间和后端加速度最大值分别为0.218 4、0.110 7、0.352 4、0.385 6、0.218 4和0.366 5 $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。与普通模糊控制相比,其加速度最大值分别降低了2.11%、1.16%、1.26%、7.22%、4.34%和10.28%;与被动悬挂相比,加速度最大值分别降低了3.36%、1.69%、3.43%、26.76%、8.20%和5.25%。几种方法的加速度均方根对比结果如表3所示。从表3可知,变论域模糊控制横移、侧滚、摇头、前端、中间和后端加速度均方根值分别为0.069 7、0.038 9、0.109 2、0.139 9、0.079 2和0.129 0 $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$,与普通模糊控制相比,其值分别降低了6.32%、3.95%、6.67%、5.28%、1.98%和1.98%;与被动悬挂相比,变论域模糊控制的值分

表 2 加速度最大值对比

Tab. 2 Comparison of maximum acceleration ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)

振动类型	控制类型		
	变论域模糊控制	普通模糊控制	被动悬挂
横移	0.218 4	0.223 1	0.226 0
侧滚	0.110 7	0.112 0	0.112 6
摇头	0.352 4	0.356 9	0.364 9
前端	0.385 6	0.415 6	0.526 5
中间	0.218 4	0.228 3	0.237 9
后端	0.366 5	0.408 5	0.386 8

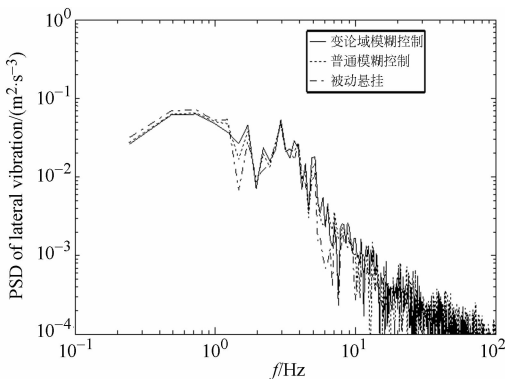
别降低了18.00%、8.47%、19.88%、17.37%、6.60%和14.68%。

表 3 加速度均方根值对比

Tab. 3 Comparison of mean square root for acceleration ($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)

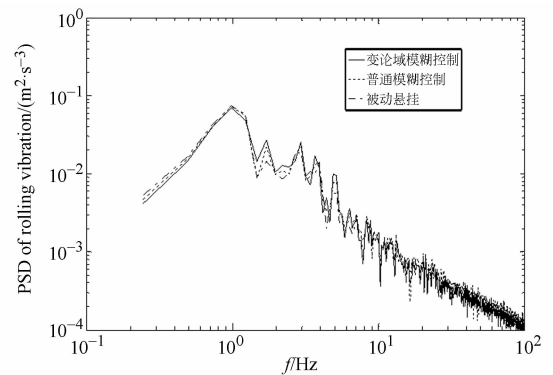
振动类型	控制类型		
	变论域模糊控制	普通模糊控制	被动悬挂
横移	0.069 7	0.074 4	0.085 0
侧滚	0.038 9	0.040 5	0.042 5
摇头	0.109 2	0.117 0	0.136 3
前端	0.139 9	0.147 7	0.169 3
中间	0.079 2	0.080 8	0.084 8
后端	0.129 0	0.131 6	0.151 2

列车横移、侧滚和摇头振动功率谱密度(Power Spectrum Density, PSD)如图3(a)、3(b)和3(c)所示;前端、中间和后端横向加速度功率谱密度如图3(d)、3(e)和3(f)所示。功率谱密度最大值对比如表4所示。从图3可以看出,列车横向加速度功率谱函数主要集中在低频段,特别是令人敏感的1 Hz以下低频段。例如,在0.732 4 Hz处横移振动加速度功率谱密度达到最大值,其中,变论域模糊控制为0.063 0 $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$,其值小于普通模糊控制和被动悬挂的0.065 9和0.071 8 $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$;同时,根据图3和表4可知,侧滚和摇头振动、前端、中间和后端的横向加速度功率谱密度分别在0.976 6、0.976 6、0.976 6、0.976 6和0.732 4 Hz达到最大值,变论域模糊控制的最大值明显小于普通模糊控制,而普通模糊控制的最大值又小于被动悬挂。变论域模糊控制的加速度功率谱密度最大值比普



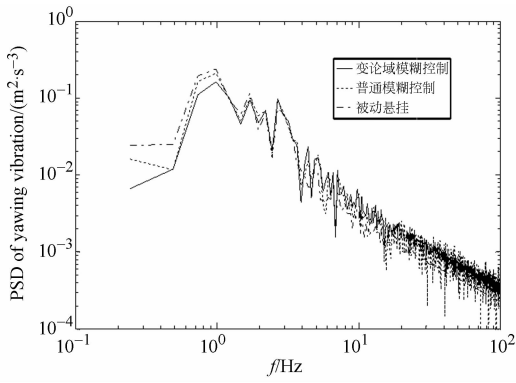
(a) 横移振动功率谱

(a) PSD of lateral vibration

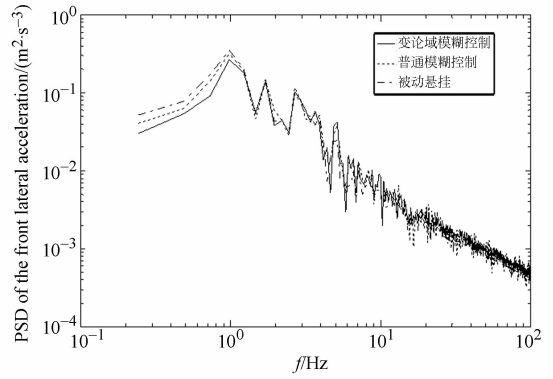


(b) 侧滚振动功率谱

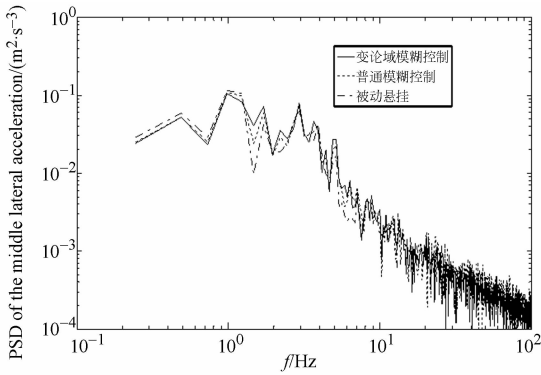
(b) PSD of rolling vibration



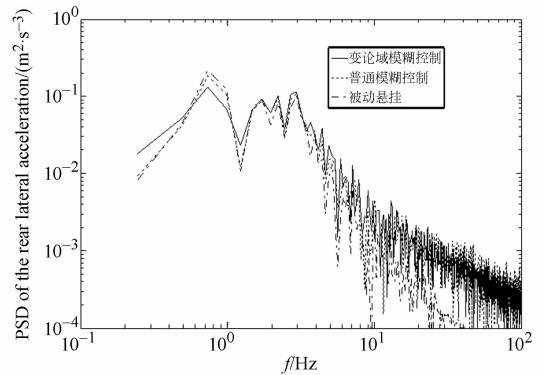
(c) 摇头振动功率谱
(c) PSD of yawing vibration



(d) 前端横向加速度功率谱
(d) PSD of the front lateral acceleration



(e) 中间横向加速度功率谱
(e) PSD of the middle lateral acceleration



(f) 后端横向加速度功率谱
(f) PSD of the rear lateral acceleration

图 3 功率谱对比结果
Fig. 3 Comparison of PSDs

通模糊控制分别降低了 4.40%、2.91%、22.63%、16.71%、4.47% 和 28.34%；比被动悬挂分别降低了 12.26%、5.28%、31.29%、24.52%、8.33% 和 40.05%。

表 4 加速度功率谱密度最大值对比

Tab. 4 Comparison of maximum values for acceleration power spectrum density (m²·s⁻³)

振动类型	控制类型		
	变论域模糊控制	普通模糊控制	被动悬挂
横移	0.063 0	0.065 9	0.071 8
侧滚	0.070 0	0.072 1	0.073 9
摇头	0.163 4	0.211 2	0.237 8
前端	0.265 6	0.318 9	0.351 9
中间	0.104 6	0.109 5	0.114 1
后端	0.132 0	0.184 2	0.220 2

6 结 论

本文推广了变论域模糊的广义收敛条件,并将其应用于列车横向半主动悬挂系统中,与普通模糊控制和被动悬挂进行了仿真对比。仿真结果表明,变论域模糊控制的横移、侧滚、摇头、前端、中间和后端加速度均方根值比普通模糊控制分别降低了 6.32%、3.95%、6.67%、5.28%、1.98% 和 1.98%；比被动悬挂分别降低了 18%、8.47%、19.88%、17.37%、6.60% 和 14.68%。在 1 Hz 左右的低频段,变论域模糊控制列车横移、侧滚、摇头振动、列车前端、中间和后端加速度的功率谱密度最大值比普通模糊控制分别降低了 4.40%、2.91%、22.63%、16.71%、4.47% 和 28.34%；比

被动悬挂分别降低了 12.26%、5.28%、31.29%、24.52%、8.33%和 40.05%。

参考文献:

- [1] 翟婉明. 车辆-轮轨耦合动力学[M]. 第三版. 北京: 科学出版社, 2007: 31-41.
ZHAI W M. *Vehicle-track Coupling Dynamics* [M]. 3rd Edition. Beijing: Science Press, 2007: 31-41. (in Chinese)
- [2] WANG D H, LIAO W H. Semi-active suspension systems for railway Vehicles using magnetorheological dampers[J]. *Vehicle System Dynamics*, 2009, 47(11): 1130-1135.
- [3] 刘宏友, 李亨利, 李莉, 等. 半主动悬挂系统动力学性能仿真分析[J]. 中国铁道科学, 2010, 31(2): 62-65.
LIU H Y, LI H L, LI L, *et al.*. Simulation analysis on the dynamics performance of the semi-active suspension system [J]. *China Railway Science*, 2010, 31(2): 62-65. (In Chinese)
- [4] 吴学杰, 王月明, 张立民, 等. 高速列车横向悬挂主动、半主动控制技术的研究[J]. 铁道学报, 2006, 28(1): 50-53.
WU X J, WANG Y M, ZHANG L M, *et al.*. Research on active and semi-active vibration control technology for lateral suspension systems of high speed trains [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2006, 28(1): 50-53. (in Chinese)
- [5] 李广军, 丁建明, 张翠芳, 等. 机车半主动悬挂模糊控制研究[J]. 现代制造工程, 2010, (11): 1-4.
LI G J, DING J M, ZHANG C F, *et al.*. Research on fuzzy control method of railway vehicle semi-active suspension system [J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2010, (11): 1-4. (in Chinese)
- [6] 丁建明, 陈春俊, 林建辉. 高速列车横向半主动悬挂系统模糊控制[J]. 交通运输工程学报, 2009, 9(2): 75-78.
DING J M, CHEN CH J, LIN J H, *et al.*. Fuzzy control of lateral semi-active suspension system for high-speed train [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2009, 9(2): 75-78. (in Chinese)
- [7] 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): 146-149.
ZHOU H T, YANG SH P, ZHU H X. Fuzzy control strategy applied in lateral semi-active control of the high-speed locomotive [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2011, 30(9): 146-149. (in Chinese)
- [8] 宋雨, 陈卫东, 张锦. 高速列车半主动悬挂系统遗传优化模糊控制[J]. 噪声与振动控制, 2012, (6): 159-164.
SONG Y, CHEN W D, ZHANG J. GA-optimized fuzzy control of semi-active suspension [J]. *Journal of Noise and vibration control*, 2012, (6): 159-164. (in Chinese)
- [9] 李洪兴. 变论域自适应模糊控制器[J]. 中国科学(E辑), 1999, 29(1): 33-42.
LI H X. Adaptive fuzzy control of variable universe [J]. *Science in China (Series E)*, 1999, 29(1): 33-42. (in Chinese)
- [10] 龙祖强, 梁昔明, 游开明, 等. 双输入单输出潜遗传变论域模糊控制算法及其收敛性[J]. 控制理论与工程, 2008, 25(4): 684-687.
LONG Z Q, LIANG X M, YOU K M, *et al.*. Double-input and single-output fuzzy control algorithm with potentially-inherited variable universe and its convergence [J]. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(4): 684-687. (in Chinese)
- [11] 方子帆, 邓兆祥. 汽车磁流变半主动悬架控制方法研究[J]. 中国机械工程, 2007, 18(9): 1122-1123.
FANG Z F, DENG ZH X. Study on control method of automotive magnetorheological semi-active system [J]. *China Mechanical Engineering*, 2007, 18(9): 1122-1123. (in Chinese)
- [12] 王其东, 王祺明, 陈无畏. 磁流变半主动悬挂变论域模糊控制研究[J]. 振动工程学报, 2009, 22(5): 513-518.
WANG Q D, WANG Q M, CHEN W W. Advanced variable universe fuzzy control with magnetorheological suspension [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2009, 22(5): 513-518. (in Chinese)
- [13] 王东亮, 顾亮, 马国新. 油气悬架变论域模糊控制仿真分析与试验研究[J]. 北京理工大学学报, 2009, 29(4): 315-317.
WANG D L, GU L, MA G X. Simulation analysis and experimental research on the variable universe fuzzy control of hydro-pneumatic suspension [J]. *Transactions of Beijing Institute of Technology*, 2009, 29(4): 315-317. (in Chinese)

作者简介:



李广军(1976—),男,黑龙江佳木斯人,博士研究生,2005年于西南交通大学获得硕士学位,主要从事智能控制与信息处理等方面的研究。E-mail: xzs023@126.com



陈春俊(1967—),男,四川蒲江人,教授,博士,主要从事车辆工程,智能控制、现代信号处理与检测技术等方面的研究。E-mail:cdccj@163.com



金炜东(1959—),男,安徽桐城人,教授,博士生导师,主要从事智能信息处理、满意优化与检测技术等方面的研究。E-mail: wdjin@home.swjtu.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)