

基于 LSSVM 的地铁弓网系统 广义动态建模与仿真

黄玉萍, 江 伟, 佟景泉, 史陆星

(广东交通职业技术学院 轨道交通系, 广东 广州 510650)

摘 要: 提出基于最小二乘支持向量机 (LSSVM) 的弓网系统广义动态建模方法, 并对弓网模型进行辨识及仿真研究。首先对离散化后的弓网系统动力学模型的线性部分和非线性部分进行分析, 构建 ARX Hammerstein 弓网系统模型, 然后根据 LSSVM 的方法对模型参数进行辨识, 最后利用弓网实际检测数据对该弓网模型进行弓网接触力的建模预报试验。试验结果表明, LSSVM-ARX Hammerstein 弓网模型可以有效地逼近弓网系统接触力的动态行为, 具有较高的预报精度, 从而验证了所提方法用于弓网系统广义动态建模的有效性。

关键词: 最小二乘支持向量机; 弓网系统; 动态建模; ARX Hammerstein 模型; 弓网接触力

中图分类号: U231; U264.3⁺4; U225.3

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2017.05.110

Simulation and Generalized Dynamic Modeling of Metro Pantograph-Catenary System Based on Least Squares Support Vector Machine

HUANG Yuping, JIANG Wei, TONG Jingquan, SHI Luxing

(Guangdong Communication Polytechnic, Guangzhou, Guangdong 510650, China)

Abstract: A Generalized dynamic modeling method was proposed for pantograph-catenary system based on least squares support machine (LSSVM), and the pantograph-catenary model identification and simulation were carried out. Firstly, the ARX Hammerstein pantograph-catenary model was built after analyzing linear and nonlinear partial section of the discrete pantograph-catenary system dynamic model. Secondly the model parameters were identified based on the method of LSSVM. Finally, the pantograph-catenary contact force was modeled and predicted by the actual testing data. The simulation results showed that LSSVM-ARX Hammerstein pantograph-catenary model could effectively approximate the dynamic behavior of the contact force in pantograph-catenary system with higher prediction accuracy. The proposed method was effective in train pantograph-catenary system generalized dynamic modeling.

Keywords: LSSVM; pantograph-catenary system; dynamic modeling; ARX Hammerstein model; pantograph-catenary contact force

0 引言

我国城市轨道交通正步入发展高速期, 大多数地铁线路采用接触网供电, 负责给地铁车辆输送牵引电能的受电弓与接触网(以下简称弓网)系统, 在列车供电系统中承担着重大任务。弓网受流原理是列车通过弓头上的滑板与接触线之间连续的电气接触和滑动接

触来获得电能, 因此, 弓网之间的接触直接影响列车受流质量。弓网系统通过接触网与受电弓之间的接触力耦合在一起, 随着列车的速度提高, 受电弓的弓头会在垂向发生振动位移, 接触力也会随之发生变化, 如果振动幅度过大, 就会加剧弓网间的磨损、引起列车受流质量下降, 导致列车供电不稳而发生故障, 严重时导致系统断电、列车停运, 从而造成重大事故和巨大的经济损失。因此弓网之间良好的接触是轨道交通安全可靠运行的重要保障。

近年来,学者们对弓网系统进行了广泛深入的研究^[1-4],建立弓网系统动力学模型是研究弓网接触关系的基础,所以弓网系统的建模问题已经成了弓网研究领域的热点。文献[5]建立各类弓网动力学分析模型,开发其数值模拟软件分析弓网结构参数;文献[6]首先分别建立接触网模型和受电弓模型,然后通过接触单元得到弓网系统的整体模型,并采用直接积分法对平衡方程进行求解;文献[7]基于 MSC-Marc 软件建立弓网系统模型,对受电弓-接触网动态振动性能进行仿真研究;文献[8]提出了一种基于 Newmark 算法的弓网系统模型,将接触网看作一个刚度不断变化的弹簧质量块系统并与受电弓系统联立,建立了弓网振动的运动方程。此外,还提出了无限长弦模型^[9]、吊弦反射模型^[10]、集中质量块模型^[11]等。弓网系统受外界和自身条件的影响,本身就是一个复杂多变的非线性系统,基于上述数学模型的假设和简化很难真实反映弓网非线性系统的各种变化。所以建立一种合适的弓网系统模型对弓网研究尤为重要。

目前,非线性系统的建模和辨识已经进行了大量的研究,而 Hammerstein 模型就是一个经典的面向块的非线性模型,它是由一个线性模块和一个非线性模块来描述非线性特征的。已知的非线性结构包括多项式函数^[12]、神经网络^[13]和最小二乘支持向量机(LSSVM)^[14]等。其中 LSSVM 是基于结构风险最小化的一种扩展,能够较好地解决数据建模过程中的高维数、非线性等复杂问题,克服了神经网络等基于经验风险最小化为训练规则的传统机器学习方法的不足,理论上不存在 BP 算法局部极小点、过拟合以及泛化能力差等缺点。

针对弓网系统复杂多变的非线性特点,本文提出基于 LSSVM 的弓网系统广义动态建模方法。把动态的弓网系统分解成线性部分和非线性部分,结合 ARX Hammerstein 模型的特点,建立基于 LSSVM 的 ARX Hammerstein 弓网系统广义动态模型。该模型的非线性结构引入 LSSVM 理论,为模型参数的辨识提供了一种良好的方法。试验结合现场弓网实际检测数据,对弓网系统接触力进行建模和预报试验,表明所提出方法的可行性和有效性。

1 列车弓网模型描述和分析

列车弓网系统是一个连续的时变非线性系统,运用二元等效受电弓模型得到弓网系统耦合动力学二阶微分方程,对微分方程进行离散化分析,把该模型分解成线性和非线性 2 个部分,为弓网系统的动态建模研究提供理论基础。

1.1 列车弓网系统描述

弓网系统是一个相对联系紧密的整体,是通过弓网接触应力耦合在一起的复杂动力学系统。弓网包括接触网和受电弓 2 个子系统,如图 1 所示为弓网系统结构图。

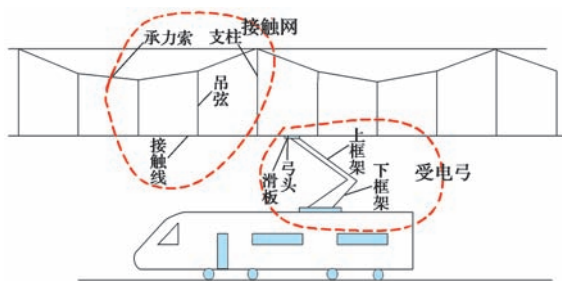


图 1 弓网系统结构图

接触网是具有一定抗弯刚度的线索结构,由支柱、吊弦、承力索、接触线等组成。受电弓安装在车体顶部,由上框架、下框架、弓头、滑板等组成。

在接触网与受电弓组成的系统中,接触网的刚度在每跨内及跨间都不同,可以看作一个时变函数,与列车的运行速度、接触网的类型及参数有关,不同悬挂方式的接触网对应的刚度表达式的参数取值也不一样。基于有限元法和最小二乘拟合得到的刚度表达式^[16]为

$$h(t) = h_0 \left[1 + \mu_1 \cos\left(\frac{2\pi v}{L}t\right) + \mu_2 \cos\left(\frac{2\pi v}{S}t\right) + \mu_3 \cos^2\left(\frac{2\pi v}{L}t\right) + \mu_4 \cos^2\left(\frac{\pi v}{L}t\right) + \mu_5 \cos^2\left(\frac{\pi v}{S}t\right) \right] \quad (1)$$

式中: h_0 为平均刚度, N/m; $\mu_1 \sim \mu_5$ 为接触网的差异系数; v 为列车速度, km/h; L 为接触网间跨距, m; S 为接触网相邻吊弦间的距离, m; t 为列车运行时间, s。

受电弓的数学模型比较复杂,在进行计算机仿真时,通常都要对受电弓的单元进行质量归算,因此目前研究受电弓的模型常采用归算质量模型。归算质量模型是利用动能等效原理将原结构简化成几个具有集总质量的模型。根据等效质量模块数目可以分为一元、二元及多元模型。本文采用二元受电弓等效模型,如图 2 所示。

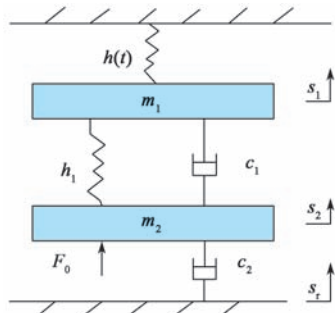


图 2 受电弓等效模型

针对图 2,可以列出弓网系统耦合动力学方程:

$$\left. \begin{aligned} m_1 \ddot{s}_1 + h_1(s_1 - s_2) + c_1(\dot{s}_1 - \dot{s}_2) + h(t)s_1 &= 0 \\ m_2 \ddot{s}_2 + h_1(s_2 - s_1) + c_1(\dot{s}_2 - \dot{s}_1) + c_2(\dot{s}_2 - \dot{s}_r) &= F_0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: s_1 、 s_2 分别为弓头和框架等效质量模块的垂向位移; m_1 、 m_2 分别为弓头和框架等效质量; c_1 、 c_2 分别为弓头与框架间的阻尼和框架与列车车体间的阻尼; h_1 为弓头与框架间的刚度; F_0 为静抬升力; s_r 为来自列车或机车的激励信号; $h(t)$ 为接触网的刚度表达式。

1.2 弓网模型的离散化

式(2)是列车弓网系统的连续模型方程,但现代检测、监控、通信等信息技术在高速列车的广泛应用,使得列车运行过程客观上是离散系统,因此需要对列

车弓网系统动力学模型方程式(2)进行离散化。常用的离散化方法包括有限差分法、双线性变换法、脉冲响应不变法等。本文采用有限差分法中的二阶差商和一阶前差商的方法来近似离散化弓网模型。

$$\begin{aligned}\dot{s} &= \frac{s(k+1)-s(k)}{T}, \\ \ddot{s} &= \frac{s(k-1)-2s(k)+s(k+1)}{T^2}\end{aligned}$$

代入式(2)可得

$$\left. \begin{aligned} h(k+1)s_1(k+1) &= -m_1 \frac{s_1(k-1)-2s_1(k)+s_1(k+1)}{T^2} + \\ & \quad h_1 \left[s_2(k+1)-s_1(k+1) \right] + \\ & \quad c_1 \frac{s_2(k+1)-s_2(k)-s_1(k+1)+s_1(k)}{T} \\ F_0 &= m_2 \frac{s_2(k-1)-2s_2(k)+s_2(k+1)}{T^2} + \\ & \quad h_1 \left[s_2(k+1)-s_1(k+1) \right] + \\ & \quad c_1 \frac{s_2(k+1)-s_2(k)-s_1(k+1)+s_1(k)}{T} + \\ & \quad c_2 \frac{s_2(k+1)-s_2(k)-s_r(k+1)+s_r(k)}{T} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: T 为单位采样时间; $k-1$, $k+1$ 分别为 k 的前一个时刻和后一个时刻。

令 $T=1$, 整理联立上述等式得

$$\begin{aligned} h(k+1)s_1(k+1) &= F_0 - m_1 s_1(k-1) - m_2 s_2(k-1) + 2m_1 s_1(k) + \\ & \quad (2m_2 + c_2)s_2(k) - c_2 s_r(k) - m_1 s_1(k+1) - (m_2 + c_2)s_2(k+1) + \\ & \quad c_2 s_r(k+1) \end{aligned} \quad (4)$$

从离散化后的弓网系统模型中可以看出, 如需要求解 $k+1$ 时刻弓网系统的接触情况, 则需要得到其前面 2 个时刻 $k-1$ 、 k 的对应值, 即初始条件已知情况下, 就可以通过求解方程组来得到弓网系统的接触情况。这是一个线性动态变化的过程。假设受电弓与接触网的接触压力在 T 时间内是保持不变的, 经 T 时间后, 接触压力会发生变化, 根据等效质量模块的垂向位移 s 和接触网刚度 $h(t)$ 的乘积得到弓网系统接触压力的实际大小。由式(1)可知, 刚度曲线是运用非线性最小二乘进行曲线拟合得到, 是一个典型的非线性表达式。

通过以上分析得知, 对列车弓网系统进行建模研究可以分成两大模块, 即线性动态变化模块和非线性模块。所以, 本文选用经典的面向块模型 Hammerstein 来对弓网系统进行建模分析, 而 ARX-Hammerstein 模型满足弓网系统两大模块的基本特征。下文将详细介绍基于 LSSVM 的 ARX-Hammerstein 弓网模型结构及其参数辨识方法。

2 基于 LSSVM 的列车弓网模型

2.1 ARX Hammerstein 弓网模型结构分析

Hammerstein 模型是由无记忆非线性环节 f 和线性

动态子系统 $\frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})}$ 组成, 其中 $y(k)$ 是输出向量, $u(k)$ 是输入向量, $x(k)$ 表示转化后的输入变量, 如图(3)所示。



图3 Hammerstein 模型

输入和输出关系如下:

$$A(q^{-1})y(k) = B(q^{-1})x(k) \quad (5)$$

$$x(k) = f(u(k)) \quad (6)$$

其中:

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_n q^{-n} \quad (7)$$

$$B(q^{-1}) = b_1 q^{-1} + b_2 q^{-2} + \dots + b_m q^{-m} \quad (8)$$

在弓网系统离散模型中, $u(k)$ 表示模型的输入, 为等效质量块的垂向位移 s_1 和 s_2 与等效质量块的速度 $\dot{s}_1$ 和 $\dot{s}_2$, 即 $u(k) = [s_1, s_2, \dot{s}_1, \dot{s}_2]$; $x(k)$ 为非线性模块的输出量, 属于中间输出量; $y(k)$ 表示弓网模型的输出量即弓网间的接触力。该模型可重新写成下面的连续形式:

$$y_t = \sum_{i=1}^n a_i y_{t-i} + \sum_{j=1}^m b_j f(u_{t-j}) + e_t \quad (9)$$

式中: $u_t \in \mathbb{Z}$; $y_t \in \mathbb{Z}$; $\{(u_t, y_t)\}$ 表示一组输入输出量;

$\sum_{i=1}^n a_i y_{t-i}$ 表示线性部分, y_{t-i} 为前时刻输出的值; a_i 为动

态变化的参数; $\sum_{j=1}^m b_j f(u_{t-j})$ 为系统的非线性部分; 方

程误差 e_t 为白色噪声序列; m 和 n 表示在线性模型中传递函数的分子和分母的阶。

在弓网离散模型中, m 和 n 分别表示 t 时刻的前一个时刻和前两个时刻, 即 $m=1$, $n=2$ 。在此, 可以反映出该弓网模型的一个特征, 必须要有前面时刻的初始值才能进行将来时刻的预测。

将 LSSVM 的理论引入上述模型式(9), 用 $\omega^T \varphi(u_{t-j}) + d_0$ 代替 Hammerstein 模型中的非线性部分 $f(u_{t-j})$ ^[14]。假

设 $b_j \omega^T = \omega_j^T$, $d = d_0 + \sum_{j=1}^m b_j$, 则模型可转化为

$$y_t = \sum_{i=1}^n a_i y_{t-i} + \sum_{j=1}^m \omega_j^T \varphi(u_{t-j}) + d + e_t \quad (10)$$

式中: $\omega^T \varphi(u_{t-j}) + d_0$ 为 LSSVM 的回归估计函数; ω 是高维特征空间的权向量; φ 为非线性映射函数; d_0 是偏差量。

式(10)是基于 LSSVM 的 ARX Hammerstein 模型结构形式, 与式(9)等价。

2.2 基于 LSSVM 的列车弓网模型参数辨识

式(10)是基于 LSSVM 的列车弓网模型表达式, 本文基于 LSSVM 理论对弓网系统的建模方法^[17]将式(10)的回归问题转化为基于 ARX Hammerstein 模型的 LSSVM 优化问题, 如下所示:

$$\min_{\omega_j, a, d, e} J(\omega_j, e) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^m \omega_j^T \omega_j + \frac{\gamma}{2} \sum_{t=r}^N e_t^2 \quad (11)$$

s.t.

$$y_t = \sum_{i=1}^n a_i y_{t-i} + \sum_{j=1}^m \omega_j^\top \varphi(u_{t-j}) + d + e_t \quad (12)$$

$$\sum_{t=1}^N \omega_j \varphi(u_t) = 0 \quad (13)$$

式中: $t=r, \dots, N$; $j=1, \dots, m$; $r=\max(m, n)+1$; e 为模型误差; γ 为正则化参数, 用来平衡模型的推广能力和估计精度。

用拉格朗日构造约束的优化问题结构如下:

$$L(\omega_j, d, a, e; \delta, \eta) = J(\omega_j, e) - \sum_{j=1}^m \eta_j \left(\sum_{t=1}^N \omega_j^\top \varphi(u_t) \right) - \sum_{t=r}^N \delta_t \left(\sum_{i=1}^n a_i y_{t-i} + \sum_{j=1}^m \omega_j^\top \varphi(u_{t-j}) \right) + d + e_t - y_t \quad (14)$$

其中 η_j 和 δ_t 是拉格朗日乘子, 对上式应用 KKT 优化^[16]条件得到:

$$\frac{\partial L}{\partial \omega_j} = 0 \rightarrow \omega_j = \sum_{t=r}^N \delta_t \varphi(u_{t-j}) + \eta_j \sum_{t=1}^N \varphi(u_t) \quad (15)$$

$$\frac{\partial L}{\partial a_i} = 0 \rightarrow \sum_{t=r}^N \delta_t y_{t-i} = 0, \quad i=1, \dots, n \quad (16)$$

$$\frac{\partial L}{\partial d} = 0 \rightarrow \sum_{t=r}^N \delta_t = 0 \quad (17)$$

$$\frac{\partial L}{\partial e_t} = 0 \rightarrow \delta_t = \gamma e_t \rightarrow e_t = \gamma^{-1} \delta_t \quad (18)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \delta_t} = 0 \rightarrow y_t = \sum_{i=1}^n a_i y_{t-i} + \sum_{j=1}^m \omega_j^\top \varphi(u_{t-j}) + d + e_t \quad (19)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \eta_j} = 0 \rightarrow \sum_{t=1}^N \omega_j^\top \varphi(u_t) = 0, \quad j=1, \dots, m \quad (20)$$

基于式 (15) ~ 式 (20), 消去变量 e 、 ω , 可以得到如下关于未知参数 d 、 a 、 δ 、 η 的线性方程组:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1_{N-r+1}^\top & 0 \\ 0 & 0 & y_p^\top & 0 \\ 1_{N-r+1} & y_p^\top & G + \gamma^{-1} I & H \\ 0 & 0 & H^\top & 1_N^\top \Omega 1_N I_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \\ a \\ \delta \\ \eta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ y_f \\ 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

其中

$$y_p = \begin{bmatrix} y_{r-1} & y_r & \dots & y_{N-1} \\ y_{r-2} & y_{r-1} & \dots & y_{N-2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{r-n} & y_{r-n+1} & \dots & y_{N-n} \end{bmatrix} \in R^{n \times (N-r+1)}$$

$$\delta = [\delta_r, \dots, \delta_N]^\top \in R^{N-r+1}$$

$$\eta = [\eta_1, \dots, \eta_m]^\top \in R^m$$

$$a = [a_1, \dots, a_n]^\top \in R^n$$

$$y_f = [y_r, y_{r+1}, \dots, y_N]^\top \in R^{N-r+1}$$

$$H(p, q_2) = \sum_{k=1}^N \Omega_{k, r+p-q-1}$$

$$p=N-r+1, q_2=N-r+1$$

$$G(p, q_1) = \sum_{j=1}^m \Omega_{p+r-j+1, q_1+r-j-1}$$

$$p=N-r+1, q_1=N-r+1$$

$\Omega_{ij} = K(x_i, x_j)$ 是满足 Mercer 条件的核函数^[17], 一般常用的核函数有高斯径向基(RBF)核函数、线性核函数、多项式核函数等, 本文采用具有全局收敛性的 RBF 核函数, 表达式如下:

$$K(x_i, x_j) = \exp\left(-\frac{\|x_i - x_j\|^2}{2\sigma^2}\right) \quad (22)$$

式中: σ 为核宽度。

通过解上述线性方程就可以得到模型未知参数 d 、 a 、 δ 、 η 的值。在 LSSVM 工具箱中, 采用模拟退火法(CSA)和单纯形法(simplex)优化训练得到参数最优解。

确定未知参数后, 对于一个新的输入 u_* , 式 (12) LSSVM 的非线性函数估计有如下形式^[12]:

$$\omega_j^\top \varphi(u_*) = \sum_{t=r}^N \alpha_t K(u_{t-j}, u_*) + \beta_j \sum_{t=1}^N K(u_t, u_*) \quad (23)$$

把式 (23) 代入式 (12), 通过 RBF 核函数的不断更新计算, 循环算出最终目标函数 y_t 的动态值并保存。

在弓网系统中, 前一时刻的输入量, 即弓头和框架的等效质量模块的垂向位移和速度 $u_* = [s_1, s_2, \dot{s}_1, \dot{s}_2]$ 是下一时刻弓网系统新的输入量, 每一时刻的输出 y_t 即为弓网间的接触力。

3 试验分析

3.1 试验参数对弓网接触力的影响

分析弓网结构参数对弓网接触力的影响, 利用 Matlab 中 Simulink 模块搭建弓网系统动力学模型公式 (2), 令受电弓的结构参数不变, 通过改变列车运行的速度, 用 Simulink 产生数据并运用于基于 LSSVM 的弓网广义动态模型中进行训练和预报试验, 分析弓网接触力的预报情况, 从而分析列车速度对于该弓网广义模型的影响, 进而分析弓网的接触受流情况。

仿真的弓网模型参数^[13]为: $h_0=3\ 600\text{ N/m}$, $m_1=6\text{ kg}$, $m_2=7\text{ kg}$, $L=63\text{ m}$, $c_1=c_2=100\text{ N}\cdot\text{s/m}$, $\mu=0.35$, 静抬升力 $F_0=90\text{ N}$ 。用示波器观测接触力曲线, 同时保存仿真中获得的数据用于弓网模型进行建模和预报试验。

考察列车速度对于弓网接触力的影响规律, 保持 h_0 , m_1 , m_2 , L , c_1 , c_2 , μ , F_0 都不变, 分别取 v 为 50, 100, 150, 200, 250, 300 km/h, 以 Simulink 产生的 100 组由弓网位移、速度组成的输入量 ($u_*=[s_1, s_2, \dot{s}_1, \dot{s}_2]$) 以及对应的 100 组由接触力构成的输出量 (接触力 F) 数据作为模型的试验数据, 前 80 组为训练数据, 后 20 组输入作为预测数据, 得到接触力的预测值。分别获取弓网系统在这 6 组速度下输入输出的变化数据, 进行弓网模型的仿真预报试验, 得到接触力的最大值、最小值, 具有较高的预报精度, 6 组数据预报误差的平均值为

0.873。表 1 为列车不同速度下弓网模型预报的接触力变化情况(最大值、最小值), 以及对应 LSSVM 超参数的值。图 4 为不同速度对接触力的变化(最大值与最小值的差值)情况。

表 1 不同列车速度下接触力变化情况

$V/(\text{km}\cdot\text{h}^{-1})$	$F_{\min}/\text{N}$	$F_{\max}/\text{N}$	$10^5\gamma$	σ^2
50	73.903 1	86.125 9	1.01	0.18
100	71.561 3	92.784 3	1.47	0.86
150	74.602 1	101.196 4	1.22	0.47
200	69.055 0	110.053 2	1.31	0.58
250	75.039 9	118.034 5	1.23	0.56
300	71.974 2	119.924 6	1.16	0.33

根据仿真数据, 在考虑框架阻尼的情况下, 得到表 1 中数据, 得出图 4 速度与接触力变化的关系。二元受电弓等效模型不同的运行速度其接触力的变化不同, 速度越大, 接触力变化幅值越大, 导致接触力大幅波动, 影响弓网的接触受流的质量。

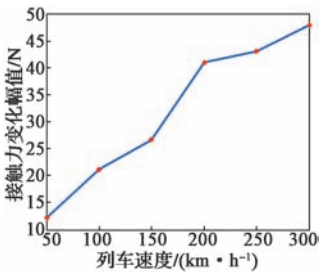


图 4 不同速度对接触力的变化幅值的影响

弓网系统接触受流的好坏具体反映在接触力上, 好的受流要求接触力的变化幅度较小, 但必须有一定的接触力使弓头与接触线紧贴, 从而保证稳定地接触受流。通过以上分析可以发现, 接触力的稳定性大小与列车速度息息相关, 列车速度越大, 受流越不稳定。该结果与文献 [5] 所述的规律基本一致, 由于弓网模型参数设置各不相同, 试验的具体结果会有差别, 但不影响最终的趋势性的结论, 说明本文方法用于弓网接触力的建模和预报是有效的。综上, 随着现在列车速度的不断提高, 必须对弓网系统进行动态特性的详细研究以及对弓网结构进行合理的设计, 从而保证弓网稳定受流和列车安全运行。

3.2 弓网实际检测数据的预报试验

实际弓网数据来源于北京车辆段受电弓以及车顶状态动态检测系统数据表, 该数据表记录了和谐号动

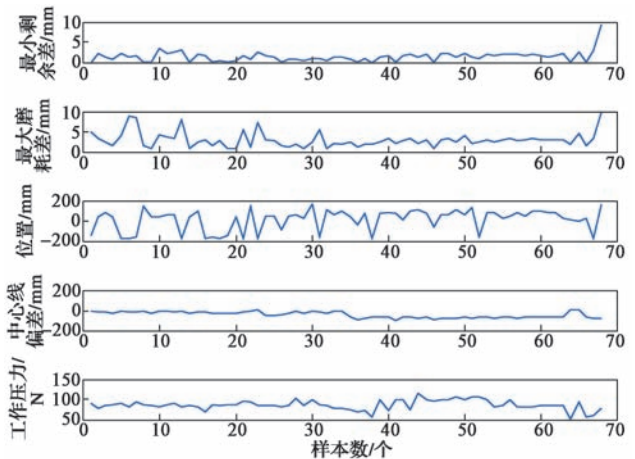


图 5 CRH5-121A 受电弓及车顶状态动态检测数据

车 CRH5-121A 的受电弓及车顶状态从 2012 年 12 月 15 日至 2013 年 4 月 20 日 4 个多月的动态检测数据。从现场受电弓及车顶状态动态检测系统数据报表中提取出 CRH5-121A 弓位 I 滑板 A 的 68 组系统检测数据如图 5 所示, 取表中的最小剩余差、最大磨损差、位置、中心线偏差作为模型的输入向量, 取工作压力作为模型的输出量, 进行工作压力的建模和预报。

针对以上检测数据不同的数值分布范围和不同的量纲, 采用式 (24) 的数据归一化方法来降低不同量纲的数据对后续建模的影响, 数据归一化的计算公式为

$$x_i = \frac{x_i - \bar{x}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$
 (24)

式中: $\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$, 为各变量均值。

数据进行归一化预处理后, 首先将这 68 组输入输出数据作为模型的训练数据, 通过 CSA 和 simplex 方法以及交叉验证得到模型的最优参数解, 其中 LSSVM 的最优超参数 γ 、 σ 分别为 26.746 2、0.032 6。由于实际检测数据量有限, 再利用这 68 组输入数据对工作压力值进行预报试验。所得预报结果与传统的 LSSVM 方法以及实际数据的比较如图 6 所示。

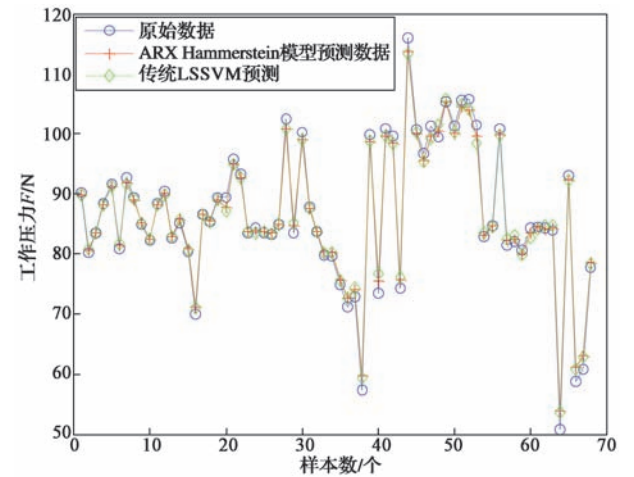


图 6 工作压力曲线预测曲线比较图

模型预测性能评判指标为均方误差 (Mean Square Error, MSE)。

$$MSE = \sum_{i=1}^n (f(x_i) - y_i)^2 / n$$
 (25)

经计算, 该模型预测结果的 $MSE=1.146\ 7$, 传统 LSSVM 方法的 $MSE=1.465\ 5$ 。由图 6 可知, 2 种模型的预测效果相差不大, ARX Hammerstein 模型初始 2 个点的数据是一样的, 属于模型初始值。本次试验以最小剩余差、最大磨损差、位置、中心线偏差作为模型的输入向量, 对工作压力的预报也达到了较好的效果, 说明该 ARX Hammerstein 弓网模型在弓网系统中运用的可行性和有效性。ARX Hammerstein 模型整体是一个非线性的动态模型, (下转第 92 页)