

(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103019267 A

(43) 申请公布日 2013. 04. 03

(21) 申请号 201210524520. 3

(22) 申请日 2012. 12. 10

(71) 申请人 华东交通大学

地址 330013 江西省南昌市青山湖区双港路

(72) 发明人 杨辉 付雅婷 李中奇 张坤鹏

刘杰民

(74) 专利代理机构 南昌市平凡知识产权代理事

务所 36122

代理人 姚伯川

(51) Int. Cl.

G05D 13/00 (2006. 01)

G05B 13/04 (2006. 01)

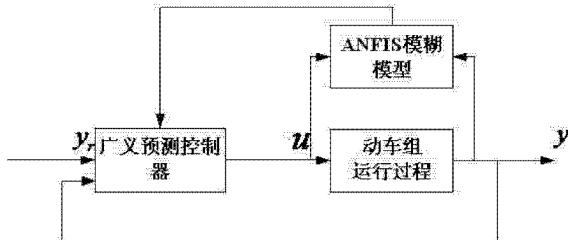
权利要求书 2 页 说明书 8 页 附图 3 页

(54) 发明名称

高速列车 ANFIS 建模与运行速度预测控制方法

(57) 摘要

一种基于 ANFIS 模型的高速列车广义预测控制方法，所述方法根据采集的高速列车运行过程数据，利用数据驱动建模方法，建立高速列车运行过程 ANFIS 模型，采用减法聚类确定模糊模型规则数和初始参数，并采用反向传播算法和最小二乘法优化模糊模型参数。本发明提出基于 ANFIS 模型的动车组运行速度预测跟踪控制方法，多步预测，循环滚动，得到准确的控制量，从而改变了凭经验调节的盲目性，使高速列车运行速度精确跟踪目标曲线，解决了大滞后问题，实现列车正点、安全、有效运行，保证了乘客安全。本发明方法简单实用，可实现高速列车自动驾驶控制。本发明适用于高速列车运行过程在线监测和自动控制。



1. 一种高速列车运行过程 ANFIS 建模和广义预测控制方法, 其特征是, 所述方法根据采集的高速列车运行过程数据, 利用数据驱动建模方法, 建立高速列车运行过程 ANFIS 模型, 采用减法聚类确定模糊模型规则数和初始参数, 并采用反向传播算法和最小二乘法优化模糊模型参数; 提出基于 ANFIS 模型的动车组运行速度预测跟踪控制方法, 实现列车安全、高效、正点运行。

2. 根据权利要求 1 所述的高速列车运行过程 ANFIS 模型与广义预测控制方法, 其特征是, 所述建立高速列车运行过程 ANFIS 模型方法为:

以高速列车运行过程受力情况的数学方程描述为基础, 确定子模型的线性结构, 据此设计高速列车运行过程 ANFIS 模型框架为:

$$\begin{aligned} R_i: \quad & y(k-1) \text{ is } A_i^1, u(k-1) \text{ is } A_i^2, \quad (i=1,2,\dots,n) \\ \text{then } & y_i(k) = \theta_1^i y(k-1) + \theta_2^i u(k-1) + \xi_i \end{aligned}$$

式中 $y(k-1)$ 、 $u(k-1)$ 是输入量, $y(k)$ 是输出量; $\theta_j^i (i=1,2,\dots,n, j=1,2)$ 为后件参数, n 是规则条数; ξ_i 是常数项; A_j^i 是输入量的第 i 个模糊集;

对采集的样本数据进行减法聚类分析, 得到最优模糊规则条数 n 和初始模型前件参数 c_{ij} 和 σ_{ij} , 并采用最小二乘法和反向传播算法对模型参数进行辨识优化, 得到最优的高速列车运行过程 ANFIS 模型为:

$$y(k) = \frac{\sum_{i=1}^n [\theta_1^i y(k-1) + \theta_2^i u(k-1) + \xi_i] \cdot \exp\left[-\left(\sum_{j=1}^2 \frac{(x_j - c_{ij})^2}{2\sigma_{ij}^2}\right)\right]}{\left(\sum_{i=1}^n \exp\left[-\left(\sum_{j=1}^2 \frac{(x_j - c_{ij})^2}{2\sigma_{ij}^2}\right)\right]\right)}$$

其中 x_j 是输入量 $y(k-1)$ 和 $u(k-1)$ 。

3. 根据权利要求 1 所述的高速列车运行过程 ANFIS 模型与广义预测控制方法, 其特征是, 所述基于 ANFIS 模型的广义预测控制方法为:

根据预测输出速度和期望输出速度之间的偏差设计性能指标函数

$$J = E \left\{ \sum_{j=N_0}^{N_t} [y(k+j) - y_r(k+j)]^2 + \sum_{j=1}^{N_u} [r_j \Delta u(k+j-1)]^2 \right\}$$

, 通过最小化性能指标, 计算获得控制量 u , 实现对高速列车运行过程速度高精度跟踪控制;

式中, $y(k+j)$ 为未来 $(k+j)$ 时刻的模型实际预测输出, $y_r(k+j)$ 为未来 $(k+j)$ 时刻的期望输出; N_0 为最小输出长度, 一般 $N_0 \geq 1$; N_t 为预测长度; N_u 为控制长度, 且

有 $N_u \leq N_t$; $\Delta u(k+j-1) = u(k+j-1) - u(k+j-2)$; r_j 为控制加权系数, 约束控制量。

4. 根据权利要求 1 所述的高速列车运行过程 ANFIS 模型与广义预测控制方法, 其特征是, 所述基于 ANFIS 模型的动车组运行速度预测跟踪控制方法在

整个控制过程将预测输出速度 y 与目标函数给出的期望输出速度 y_r 之间的误差反馈给广义预测控制器, 经过具体计算获得并输出控制量 u , 从而实现列车速度跟踪。

高速列车 ANFIS 建模与运行速度预测控制方法

[0001]

技术领域

[0002] 本发明涉及高速列车运行过程建模与速度预测跟踪控制方法,属高速列车运行过程监测与自动控制技术领域。

背景技术

[0003] 随着社会的快速发展,运输量不断增加,为加强现代综合运输体系的建设,根据《国民经济和社会发展第十二个五年规划纲要》,我国需大力发展高速铁路,基本建成国家快速铁路网。高速列车是高速铁路技术体系的核心,是国家相关高技术水平、相关制造能力、自主创新能力以及国家核心竞争力的综合体现,对于具有高速度、高密度运营特性的高速铁路来说,高速列车运行安全是重中之重,然而高速列车作为一个由复杂技术装备组成、在复杂环境中运行、完成具有复杂时空分布特征的位移服务的非线性动力学系统,如何对高速列车运行过程建立有效的模型和实施速度跟踪控制,对确保高速列车安全、平稳运行尤为关键。

[0004] 针对高速列车运行过程的建模,通常采用基于牵引计算和运行阻力经验模型的描述方法,但其无法完整刻画动车组复杂多变的动态行为;多模型方法可部分解决动车组运行过程建模问题,但在高速列车高速运行时如何在线平稳切换模型仍缺乏有效策略。针对列车运行过程,常用的控制方法有:(1) 经典控制算法,主要是 PID 控制算法。1968 年,伦敦第一条盈利性投入运营的线路——维多利亚线就是运用了该算法,但是 PID 控制算法无自适应能力,不能适应复杂控制过程。(2) 智能控制算法。有人提出采用模糊控制方法实现列车自动停车,取得了比 PID 更好的控制效果;(3) 集成智能控制算法。有文献采用模糊神经网络控制实现列车运行过程跟踪,解决模糊控制规则数量多、相互冲突等问题;上述控制方法主要应用在城市轨道交通等普通速度列车,目前还没有应用在高速铁路上。

发明内容

[0005] 本发明的目的是,对复杂的高速列车运行过程建立有效的自适应神经模糊推理系统(ANFIS)模型描述,基于列车运行过程 ANFIS 模型,通过预测输出速度和期望输出速度之间的偏差设计性能指标函数,采用广义预测控制方法,实现高速列车的高精度速度跟踪控制。

[0006] 本发明的技术方案是:本发明根据采集的高速列车运行过程数据,利用数据驱动建模方法,建立高速列车运行过程 ANFIS 模型,采用减法聚类确定模糊模型规则数和初始参数,并采用反向传播算法和最小二乘法优化模糊模型参数;提出基于 ANFIS 模型的动车组运行速度预测跟踪控制方法,实现列车安全、高效、正点运行。

[0007] 本发明基于 ANFIS 的高速列车运行过程建模步骤为:

1、分析高速列车运行过程的受力情况,如图 1 所示,其运动过程动力学模型可表示为:

$$\frac{dy}{dt} + \varepsilon A + \varepsilon B y + \varepsilon C y^2 = \varepsilon u \quad (1)$$

式中, y 是高速列车运行速度, ε 是加速度系数, u 为单位控制力(牵引力 / 制动力), $w_0 = A + B y + C y^2$ 为单位基本阻力, A, B, C 是阻力系数, 公式 (1) 的差分方程表述为 :

$$y(k) = f\{y(k-1), u(k-1)\} \quad (2)$$

2、建立基于 ANFIS 的高速列车运行过程模型。本发明根据动车组运行过程, 采用模糊推理规则进行建模, 以高速列车运行过程受力情况的数学方程描述为基础, 确定子模型的线性结构, 据此设计高速列车运行过程 ANFIS 模型框架 :

$$\begin{aligned} R_i: \quad & y(k-1) \text{ is } A_i, u(k-1) \text{ is } A_i, \quad (i=1,2,\dots,n) \\ & \text{then } y_i(k) = \theta_1^i y(k-1) + \theta_2^i u(k-1) + \xi_i \end{aligned} \quad (3)$$

式中 $y(k-1), u(k-1)$ 是输入量, $y(k)$ 是输出量; $\theta_j^i (i=1,2,\dots,n, j=1,2)$ 为后件参数, n 是规则条数; ξ_i 是常数项; A_i 是输入量的第 i 个模糊集, 本发明采用高斯型函数表示 :

$$\mu_{A_i} = \exp \left[-\frac{(x_j - c_i)^2}{2\sigma_i^2} \right] \quad (i=1,2,\dots,n, j=1,2) \quad (4)$$

其中 x_j 是输入量 $y(k-1)$ 和 $u(k-1)$; 前件参数 c_i 和 σ_i 分别表示隶属函数的中心和宽度。

[0008] 模糊推理规则 (3) 可用图 2 所示的 5 层 ANFIS 网络结构获得 :

$$\begin{aligned} y(k) &= \sum_{i=1}^n \bar{\omega}_i \cdot y_i(k) \\ &= \sum_{i=1}^n \bar{\omega}_i [\theta_1^i y(k-1) + \theta_2^i u(k-1) + \xi_i] \end{aligned} \quad (5)$$

$$\text{式中 } \bar{\omega}_i = \frac{\omega_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \quad (6)$$

$$\omega_i = \mu_{A_1} \mu_{A_2} \quad (7)$$

根据 (4)-(7) 的推导, 动车组运行过程模型 (5) 可重写为 :

$$\begin{aligned}
 y(k) &= \left(\sum_{i=1}^n y_i(k) \prod_{j=1}^2 \mu_{x_j} \right) / \left(\sum_{i=1}^n \prod_{j=1}^2 \mu_{x_j} \right) \\
 &= \frac{\left(\sum_{i=1}^n y_i(k) \cdot \exp \left[-\left(\sum_{j=1}^2 \frac{(x_j - c_i)^2}{2\sigma_i^2} \right) \right] \right)}{\left(\sum_{i=1}^n \exp \left[-\left(\sum_{j=1}^2 \frac{(x_j - c_i)^2}{2\sigma_i^2} \right) \right] \right)} \\
 &= \frac{\left(\sum_{i=1}^n [\theta_1 y(k-1) + \theta_2 u(k-1) + \xi_i] \cdot \exp \left[-\left(\sum_{j=1}^2 \frac{(x_j - c_i)^2}{2\sigma_i^2} \right) \right] \right)}{\left(\sum_{i=1}^n \exp \left[-\left(\sum_{j=1}^2 \frac{(x_j - c_i)^2}{2\sigma_i^2} \right) \right] \right)} \quad (8)
 \end{aligned}$$

3、对采集的样本数据进行减法聚类分析,得到最优模糊规则条数 n 和初始模型前件参数 c_i 和 σ_i ,并采用最小二乘法和反向传播算法对模型参数进行辨识优化,得到最优的高速列车运行过程 ANFIS 模型。

[0009] 为得到模型 (8),要对模型进行初始化。针对动车组运行过程模型 (8),需要基于输入 / 输出数据确定模型规则数 n 及每条规则对应的初始参数 c_i 和 σ_i ,本发明采用减法聚类算法来完成这一过程(聚类的个数对应于模型的规则条数,聚类的中心和半径对应于模型的前件参数)。减法聚类方法是将每个数据点作为可能的聚类中心,并根据各个数据点周围的数据点密度来计算该点作为聚类中心的可能性,克服了其它聚类法计算量随着问题的维数按指数增长的不足。聚类中心获得如下:

$$D_p = \sum_{q=1}^m \exp \left[-\frac{\|X_p - X_q\|^2}{(\delta_a/2)^2} \right] \quad (p, q = 1, 2, \dots, m) \quad (9)$$

其中, m 为输入 / 输出数据对个数, δ_a 为聚类中心有效邻域半径,是一个正数。选择密度指标最高值 $D_{max} = \max D_p$, 得到第一个聚类中心 $c_1 = X_p |_{D_p}$, 余类推。

[0010] 最后,对模型 (8) 进行优化,获得最优 ANFIS 模型。针对模型 (8),在确定了前件参数 c_i 和 σ_i 后,应用输入 / 输出数据采用最小二乘法即可辨识后件参数 $\theta_j (i=1, 2, \dots, n, j=1, 2)$ 。若有 m 组输入输出数据对,式 (8) 则写成:

$$\mathbf{Y} = \Phi \cdot \Theta \quad (10)$$

式中 Φ 为 $m \times 2n$ 的矩阵, Θ 为 $2n \times 1$ 的后件参数向量。可对公式 (10) 采用最小二乘法辨识得到后件参数 $\hat{\theta}_j$, 令误差指标函数为 $J(\Theta) = \frac{1}{2} \|\mathbf{Y} - \hat{\mathbf{Y}}\|^2$, 根据最小二乘法原理, 要使 $J(\Theta)$ 最小, 必有:

$$\Theta = (\Phi^T \cdot \Phi)^{-1} \cdot \Phi^T \hat{\mathbf{Y}} \quad (11)$$

从而得到优化的模型后件参数 $\hat{\theta}_j$, $i = 1, 2, \dots, n$, $j = 1, 2$ 。

[0011] 固定后件参数 $\hat{\theta}_j$, 采用反向传播算法反向学习以调整前件参数 c_i 和 σ_j 。考虑到误差指标函数 $E = \frac{1}{2} (y(k) - \hat{y}(k))^2$, $y(k)$ 是 k 时刻的当前输出; $\hat{y}(k)$ 是期望输出。校正算法如下:

$$\begin{cases} c_i(k+1) = c_i(k) - \alpha_c \frac{\partial E}{\partial c_i} \\ \sigma_j(k+1) = \sigma_j(k) - \alpha_\sigma \frac{\partial E}{\partial \sigma_j} \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2) \quad (12)$$

其中学习速率 α_c 和 α_σ 可以通过实验选择得到。

[0012] 4、高速列车速度跟踪控制设计:

本发明提出基于 ANFIS 模型的广义预测控制方法来实现高速列车的高精度速度跟踪控制, 其原理如图 3 所示。整个控制过程将预测输出速度 \mathbf{y} 与目标函数给出的期望输出速度 \mathbf{y}_r 之间的误差反馈给广义预测控制器, 经过具体计算获得并输出控制量 u , 从而实现列车速度跟踪。控制律获得过程为:

建模过程得到的公式 (5) 可描述为受控自回归积分滑动平均过程模型 (Controlled Auto-Regressive Integrated Moving Average, CARIMA) 形式

$$\bar{a}(z^{-1})y(k) = \bar{b}(z^{-1})u(k-1) + c(z^{-1})\xi(k) \quad (13)$$

为了获得控制律, 需最小化以下性能指标函数:

$$J = E \left\{ \sum_{j=N_0}^{N_t} [y(k+j) - y_r(k+j)]^2 + \sum_{j=1}^{N_u} [r_j \Delta u(k+j-1)]^2 \right\} \quad (14)$$

式中, $y(k+j)$ 为未来 $(k+j)$ 时刻的模型实际预测输出, $y_r(k+j)$ 为未来 $(k+j)$ 时刻的期望输出; N_0 为最小输出长度, 一般 $N_0 \geq 1$; N_t 为预测长度; N_u 为控制长度, 且有 $N_u \leq N_t$; $\Delta u(k+j-1) = u(k+j-1) - u(k+j-2)$; r_j 为控制加权系数, 约束控制

量。引入 Diophantine 方程：

$$1 = \bar{a}(z^{-1})e_j(z^{-1}) + z^{-j}g_j(z^{-1}) \quad (15)$$

$$f_j(z^{-1}) = b(z^{-1})e_j(z^{-1}) \quad (16)$$

$$f_j(z^{-1}) = b(z^{-1})e_j(z^{-1}) = l_j(z^{-1}) + z^{-j}h_j(z^{-1})$$

(17)

由 (13)、(15) 和 (16) 可获得：

$$\begin{aligned} y(k+j) &= g_j(z^{-1})y(k) + f_j(z^{-1})\Delta u(k+j-1) + \\ &\quad e_j(z^{-1})\xi(k+j) \end{aligned} \quad (18)$$

当最优实际预测估计输出

$$y^*(k+j) = g_j(z^{-1})y(k) + f_j(z^{-1})\Delta u(k+j-1)$$

(19)

时, 性能指标函数 J 取得最小值。

[0013] 将式 (14) 写成矩阵形式：

$$\begin{aligned} J &= E \left\{ \left[\mathbf{Y}(k+j) - \mathbf{Y}_r(k+j) \right]^T \mathbf{Q} \left[\mathbf{Y}(k+j) - \mathbf{Y}_r(k+j) \right] + \right. \\ &\quad \left. \mathbf{\Delta U}^T(k+j-1) \mathbf{R} \mathbf{\Delta U}(k+j-1) \right\} \end{aligned} \quad (20)$$

将式 (17) 代入式 (18) 中, 矩阵形式可表示为 :

$$\begin{aligned} \mathbf{Y}(k+j) &= \mathbf{L} \mathbf{\Delta U}(k+j-1) + \mathbf{H} \mathbf{\Delta U}(k+j) + \\ &\quad \mathbf{G} \mathbf{Y}(k) + \mathbf{E} \xi(k+j) \end{aligned} \quad (21)$$

式 (21) 中, 右边第一项 $\mathbf{L} \mathbf{\Delta U}(k)$ 为零状态预测, 第二、三项 $\mathbf{H} \mathbf{\Delta U}(k+j)$ 、 $\mathbf{G} \mathbf{Y}(k)$ 为零输入预测, 这三项组成最优预测估计输出 :

$$\mathbf{Y}^*(k+j) = \mathbf{L} \mathbf{\Delta U}(k+j-1) + \mathbf{H} \mathbf{\Delta U}(k+j) + \mathbf{G} \mathbf{Y}(k) \quad (22)$$

将式 (22) 带入 (20) 中, 由 $\frac{\partial J}{\partial \mathbf{\Delta U}(k+j-1)} = \mathbf{0}$ 得到最优控制律 :

$$\begin{aligned} \mathbf{\Delta U}(k+j-1) &= (\mathbf{L}^T \mathbf{Q} \mathbf{L} + \mathbf{R})^{-1} \mathbf{L}^T \mathbf{Q} \left[\mathbf{Y}_r(k+j) - \right. \\ &\quad \left. \mathbf{H} \mathbf{\Delta U}(k+j) - \mathbf{G} \mathbf{Y}(k) \right] \end{aligned} \quad (23)$$

从而滚动优化可获得第 k 拍的控制为

$$\begin{aligned} \mathbf{u}(k) &= \mathbf{u}(k-1) + \Delta \mathbf{u}(k) \\ &= \mathbf{u}(k-1) + \mathbf{I}_s^T \left[\mathbf{Y}_r(k+j) - \mathbf{H} \mathbf{\Delta U}(k+j) - \mathbf{G} \mathbf{Y}(k) \right] \end{aligned} \quad (24)$$

式中, \mathbf{L}_1^T 为 $(\mathbf{L}^T \mathbf{Q} \mathbf{L} + \mathbf{R})^{-1} \mathbf{L}^T \mathbf{Q}$ 的第一行。

[0014] 综上所述,对于复杂的非线性高速列车运行过程,建立能以任意精度逼近任一闭子集实连续函数的 ANFIS 模型,提出基于 ANFIS 模型的广义预测控制,获得控制力实现高速列车速度跟踪控制,保证了乘客的安全和乘坐舒适性。

[0015] 本发明与现有技术比较的有益效果是,高速列车运行过程具有非线性动力学特征,且环境复杂多变,一般采用经验模型和多模型切换方法,难以建立精确稳定的控制模型,从而影响速度跟踪控制。本技术方案根据运行数据应用减法聚类获得最优模糊规则个数和初始参数,并采用反向传播算法和最小二乘法优化模型参数,在线精确辨识,充分利用现场数据,避免经验模型的单一性;建立的 ANFIS 模糊模型采用的是模型融合的理念,改进了多模型切换不稳定的缺点。提出基于 ANFIS 模型的广义预测控制方法,多步预测,循环滚动,得到准确的控制量,从而改变了凭经验调节的盲目性,使高速列车运行速度精确跟踪目标曲线,解决了大滞后问题,实现列车正点、安全、有效运行,保证了乘客安全。本技术方案简单实用,可实现高速列车自动驾驶控制。

[0016] 本发明适用于高速列车运行过程在线监测和自动控制。

附图说明

[0017] 图 1 为动车组运行过程受力情况;

图 2 为 ANFIS 网络结构;图中,1 是第 1 层;2 是第 2 层;3 是第 3 层;4 是第 4 层;5 是第 5 层;

图 3 为 ANFIS 模型广义预测控制器控制原理框图;图中 y_e 是期望输出速度; u 是控制量; y 是预测输出速度;

图 4 为 $y(k-1)$ 隶属函数曲线;

图 5 为 $u(k-1)$ 隶属函数曲线;

图 6 为检验数据的输出误差分布曲线,纵坐标为误差值;

图 7 为高速列车从济南西到徐州东的列车速度跟踪曲线,实线曲线为给定速度曲线,虚线曲线为预测速度曲线;

图 8 为牵引力 / 制动力曲线,纵坐标为控制力值;

具体实施方式

[0018] 本发明实施选用京沪高铁线路的某 CRH 型动车组为实验验证对象,采集改动车组在某线路段的 2000 组速度、控制力数据,并以其中 1200 组数据作为建模数据样本,剩余 800 组数据作为检验数据。

[0019] 首先,根据采集的 1200 组建模样本数据,采用减法聚类可确定模型的最佳规则数为 6,据此,采用梯度下降算法和最小二乘法获得模型的前件和后件参数,输入 $y(k-1)$ 和 $u(k-1)$ 的隶属函数分别如图 4 和图 5 所示,模糊模型规则如表 1,模糊规则前件参数 c_i 和

σ 如表 2。为验证模型有效性,采用剩余 800 组运行数据对建立的模型进行检验,其模型输出误差分布曲线如图 6。

表 1 ANFIS 模型规则

模糊规则	
R_1	$\text{if } y(k-1) \text{ is } A_1^1, u(k-1) \text{ is } A_2^1,$ $\text{then } y_1(k) = 0.959y(k-1) + 0.0228u(k-1) - 11.79$
R_2	$\text{if } y(k-1) \text{ is } A_1^2, u(k-1) \text{ is } A_2^2,$ $\text{then } y_2(k) = -0.5391y(k-1) - 2.253u(k-1) + 1252$
R_3	$\text{if } y(k-1) \text{ is } A_1^3, u(k-1) \text{ is } A_2^3,$ $\text{then } y_3(k) = 0.3768y(k-1) - 0.1105u(k-1) + 143.8$
R_4	$\text{if } y(k-1) \text{ is } A_1^4, u(k-1) \text{ is } A_2^4,$ $\text{then } y_4(k) = -0.1687y(k-1) + 2.006u(k-1) + 94.07$
R_5	$\text{if } y(k-1) \text{ is } A_1^5, u(k-1) \text{ is } A_2^5,$ $\text{then } y_5(k) = 0.03086y(k-1) + 2.386u(k-1) - 3.018$
R_6	$\text{if } y(k-1) \text{ is } A_1^6, u(k-1) \text{ is } A_2^6,$ $\text{then } y_6(k) = 0.6771y(k-1) + 1.794u(k-1) - 55.72$

表 2 ANFIS 模型规则前件参数

规则 R_i	模型前件参数			
	A_1^i		A_2^i	
	c_{ii}	σ_{ii}	c_{i2}	σ_{i2}
R_1	27.27	61.49	518.4	94.5
R_2	37.9	61.07	483	92.04
R_3	96.43	26.18	300.8	97.47
R_4	127.3	72.2	90.34	98.01
R_5	223.6	63.62	48.22	93.15
R_6	246.7	51.35	27.39	93.26

观察图 6 的模型验证过程,模型输出误差范围 : $-1.935 \sim 1.879 \text{ km/h}$, 满足 CTCS-3 列控系统的定位测速要求,即 30 km/h 以下 $\pm 2 \text{ km/h}$, 30 km/h 以上不超过速度值的 2%, 表明所建立的 ANFIS 模型精度高,泛化能力强,有较好预测效果。

[0020] 其次,控制器设计过程。基于上述模型,采用广义预测控制对 CRH 型动车组在京沪高铁线路的济南西站——徐州东站的实际运行速度进行跟踪控制,得到图 7 速度跟踪曲线

和图 8 牵引力 / 制动力曲线。

[0021] 图 7 表明基于 ANFIS 模型的动车组速度跟踪控制方法在牵引、恒速、惰行、制动工况下均有良好的跟踪能力。保证了动车组的停靠准确性和安全性。图 8 描述了动车组的单位控制力（牵引力 / 制动力）在整个运行过程缓和变化，过渡比较平滑，启动提速阶段变化较平稳，乘客舒适性指标得到一定程度的提高。

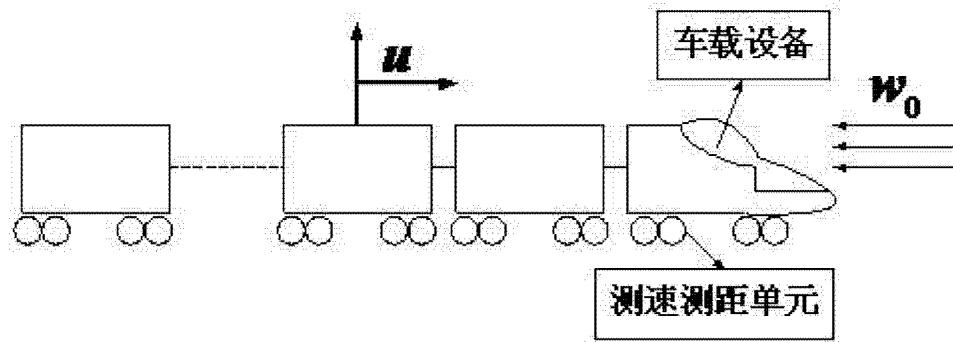


图 1

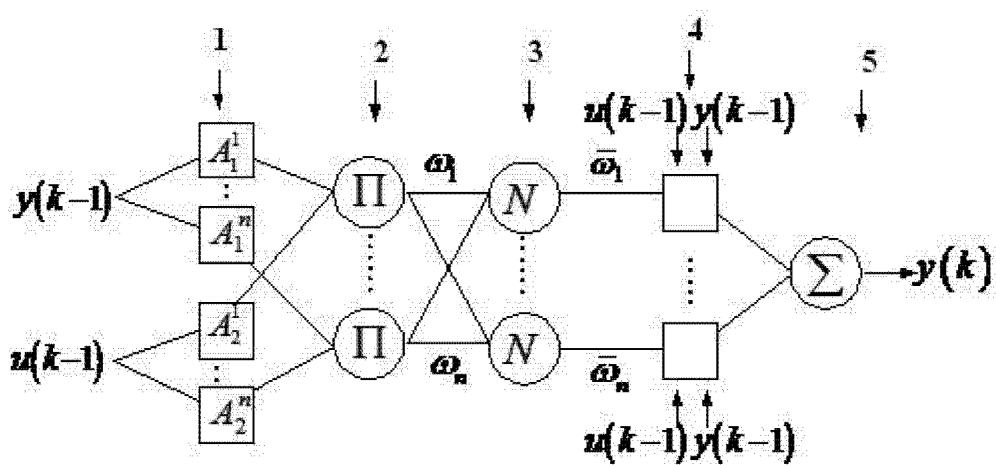


图 2

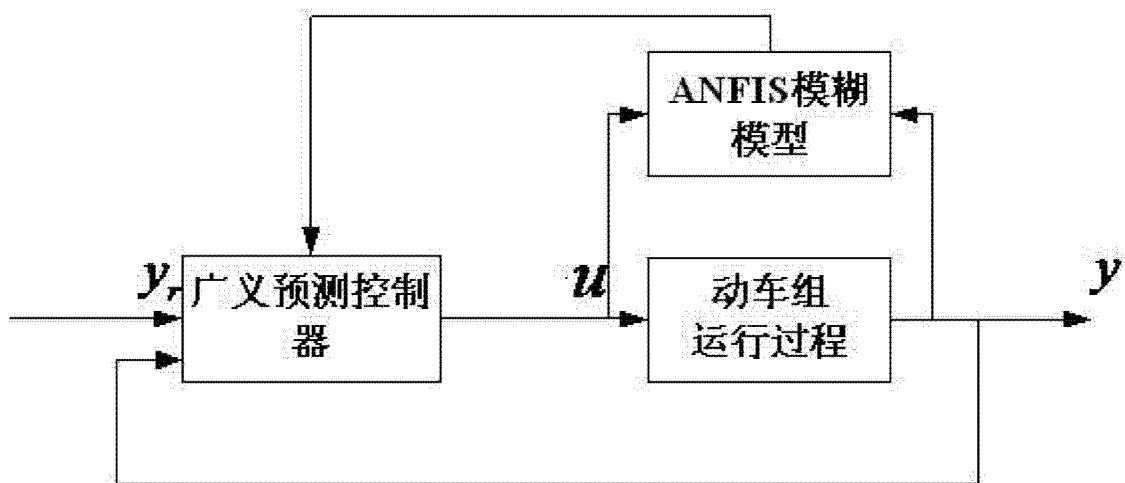


图 3

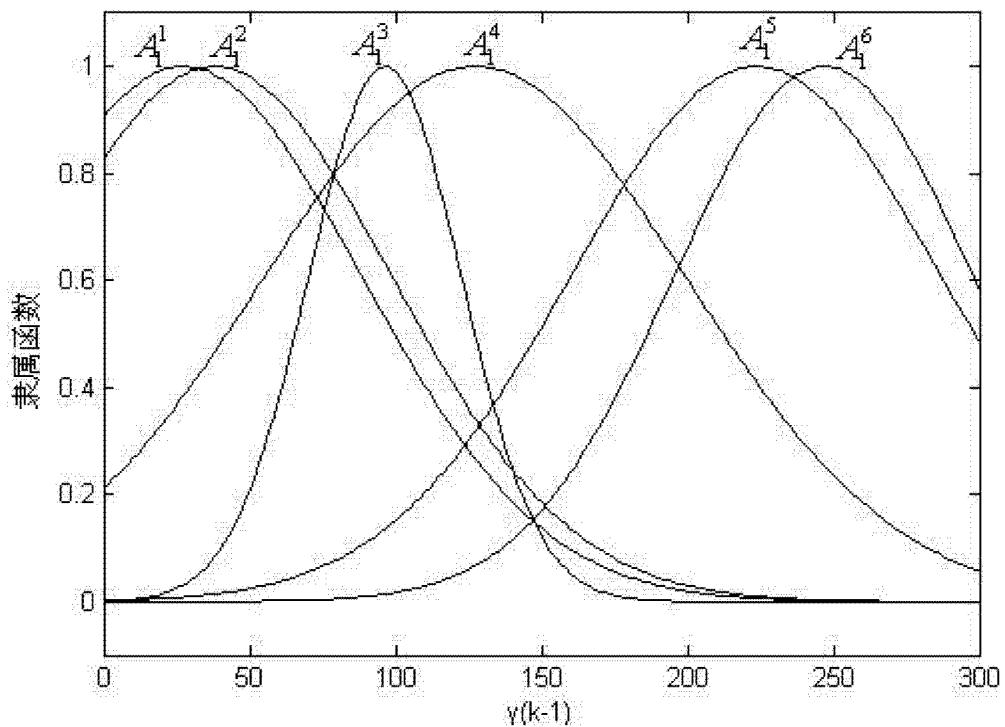


图 4

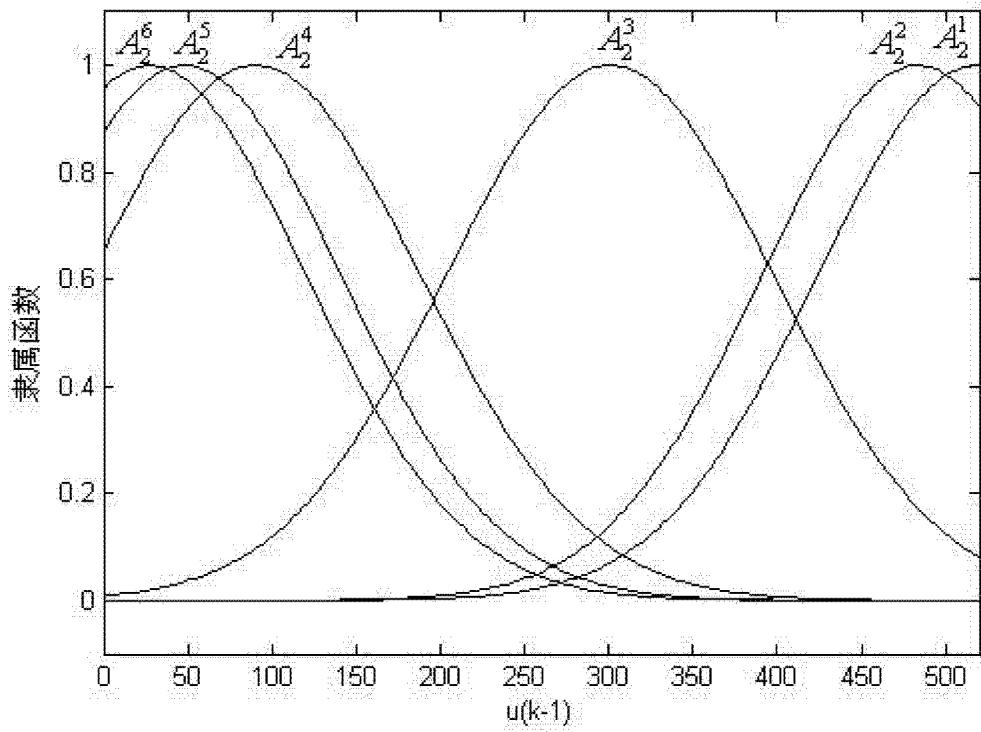


图 5

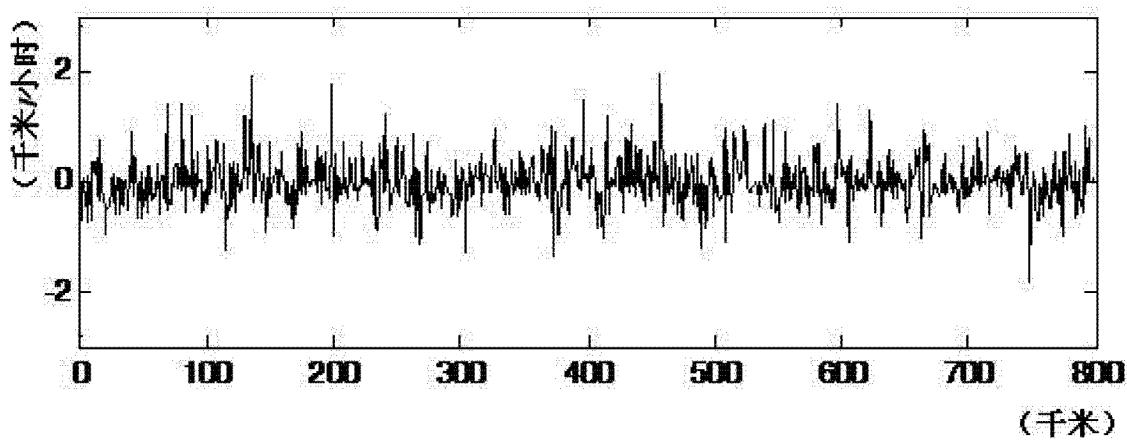


图 6

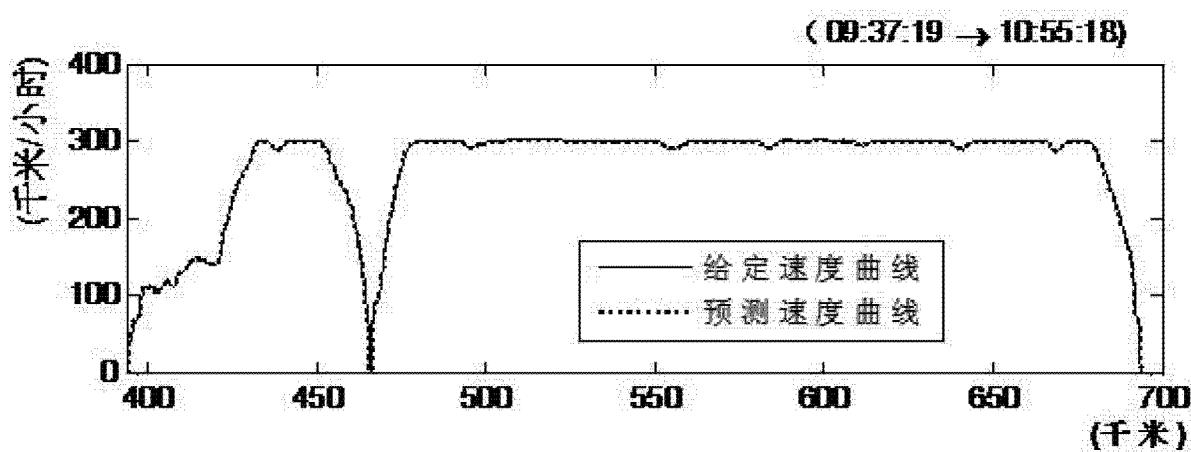


图 7

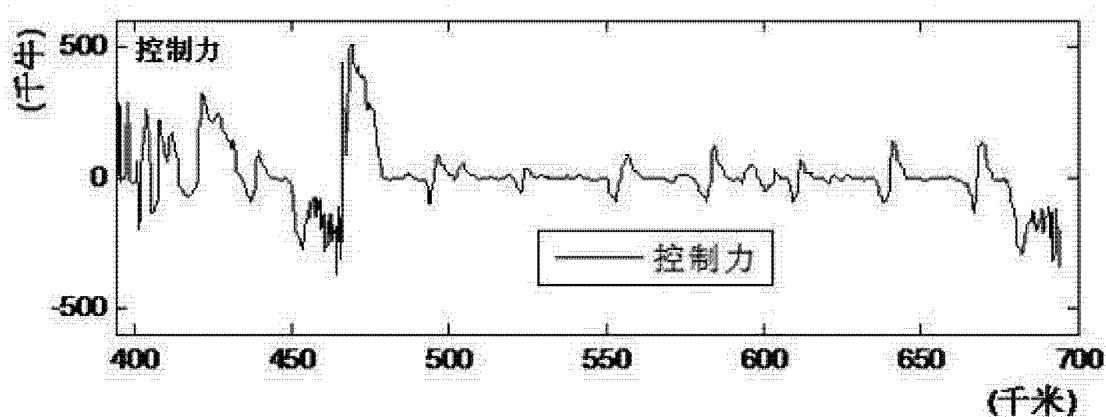


图 8