

文章编号:1009-3087(2013)02-0188-05

基于多尺度小波神经网络的工程车辆换挡策略

李秀兰^{1,2}, 秦四成^{1*}, 杨宏韬^{3,4}

(1. 吉林大学 机械科学与工程学院, 吉林 长春 130022; 2. 长春工业大学 工程训练中心, 吉林 长春 130012;

3. 长春工业大学 电气与电子工程学院, 吉林 长春 130012; 4. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘 要:介绍了以提高工程车辆传动系效率为目的的自动换挡原理,以多尺度小波神经网络为基础构建了换挡模型,并利用自动变速控制实验数据对建立的模型进行验证性实验。实验结果表明,基于多尺度小波神经网络的换挡模型比遗传 BP 神经网络的换挡模型准确度更高,能更准确地实现换挡,更进一步提高了工程车辆传动系统的效率,达到了节约能源、增加效率的目的。

关键词:工程车辆;换挡原理;多尺度小波神经网络

中图分类号:U463.22

文献标志码:A

Shift Strategy of Construction Vehicle Based on Multi-scale Wavelet Neural Network

LI Xiu-lan^{1,2}, QIN Si-cheng^{1*}, YANG Hong-tao^{3,4}

(1. College of Mechanical Sci. and Eng., Jilin Univ., Changchun 130022, China;

2. Eng. Training Center, Changchun Univ. of Technol., Changchun 130012, China;

3. Inst. of Electrical and Electronic Eng., Changchun Univ. of Technol., Changchun 130012, China;

4. Changchun Inst. of Optics Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: The automatic transmission principle was introduced to improve the efficiency of transmission system of construction vehicles, by using experimental data of automatic speed control to establish and verify the shift model based on multi-scale wavelet neural network. The results showed that the shift model based on multi-scale wavelet neural network can achieve higher accuracy than genetic BP neural network. It can further improve the efficiency of transmission system of construction vehicles and save energy.

Key words: construction vehicles; shift principle; multi-scale wavelet neural network

工程车辆种类很多,主要包括装载机、推土机、挖掘机、压路机等机械类车辆,这些车辆广泛应用于公路、建筑、桥梁、矿山等建设施工过程中。其传动系统主要采用液力传动,因为液力传动系统对外负载有良好的自动调节和适应性,能够延长动力传动系统的使用寿命,并且能够提高车辆的行驶性能和乘坐的舒适性。但是液力传动系统存在传动效率较低的不足,造成了能源的浪费,这与现代社会节能减排要求不相符合。针对这一不足,国外的一些工程机械公司一方面主要是考虑降低发动机排放量、提

高液压系统效率;另一方面则是从减振、降噪等方面入手潜心研究。目前,国内的一些工程机械公司和高等院校主要考虑通过液力变矩器闭锁控制来提高传动系效率^[1-2]。前人研究方法中存在着系统结构复杂,不易控制,没有考虑变速箱换挡时机对车辆性能的影响等问题。

因此,作者首次提出了一种基于多尺度小波神经网络的工程车辆自动换挡方法。通过控制变速箱自动调节挡位,来保持液力变矩器工作在高效区,提高整个工程车辆传动系效率,从而达到节能降耗的目的。

1 变速箱换挡原理

工程车辆整个传动系统工作过程是非常复杂的,动力由发动机输出,经液力变矩器泵轮到涡轮再传递到变速箱,最后传递到驱动桥,驱动车辆行驶。由于机械传动效率相对来说较高,因此,液力机械传

收稿日期:2012-09-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50775096);国家科技支撑计划资助项目(2013BAF07B00)

作者简介:李秀兰(1980—),女,博士生。研究方向:工程车辆节能减排技术。E-mail:dearxiulan@126.com

* 通信联系人 E-mail:qsc925@hotmail.com

动系统的传动效率主要取决于液力变矩器的传动效率。当车辆行驶过程中遇到较高强度负载,或者负载突然急剧增加时,液力变矩器传动效率将会大幅度下降^[3]。所以以提高液力传动效率为主要目标。通过变速箱自动换挡,使液力变矩器工作在高效区(高效区是人为规定的包含最大效率点的转速区间),从而提高整个工程车辆传动系统的效率,进而达到节约能源的目的。液力变矩器的原始特性曲线如图1所示^[4], i 为传动比,则:

$$i = \frac{n_w}{n_b} \quad (1)$$

式中: n_w 为液力变矩器涡轮转速, r/min; n_b 为泵轮转速, r/min。

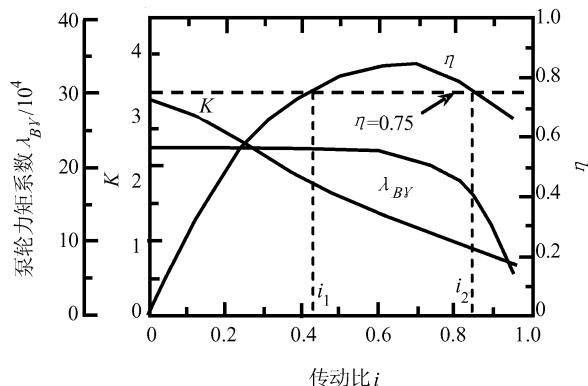


图1 液力变矩器原始特性曲线图

Fig. 1 Hydraulic torque converter original characteristic curves

η 曲线为液力变矩器的效率曲线, K 为变矩比。为了保证传动系的效率,以变矩器效率 η 曲线和高效区最低限的相交点 i_1 、 i_2 为换挡点。即:

当 $i_1 \leq i \leq i_2$ 时, $\eta \geq 0.75$, 此时液力变矩器工作效率较高,不需要换挡,挡位保持上一状态不变;当 $i < i_1$ 或 $i > i_2$ 时, $\eta < 0.75$, 此时液力变矩器效率较低,可以通过变速器自动换挡,选取相应挡位来保证液力变矩器工作在高效区范围内。

上面所述的换挡规律是在某一特定油门开度下得到的,并没有考虑油门开度的变化。在不同油门开度下,使用相同的方法求得相应油门开度的换挡点,就可以得到换挡规律。将工作油泵消耗功率等效为油门开度 $\Delta\alpha$,再根据油门开度 $\alpha - \Delta\alpha$ 、传动比 i ,按照上述换挡规律进行换挡。这样,以反映驾驶员操作意图的发动机油门开度 α 、反映变矩器工作特性的传动比 i 和反映发动机消耗转矩和功率的工作油泵压力 P 为参数,反映车辆行驶状况,进行自动换挡。更加符合工程车辆的实际工作状况,能够提高液力机械传动系的传动效率、节约能源,符合现在社会节

能环保发展要求,具有积极的现实意义。

2 多尺度小波神经网络换挡模型的构建

小波分析是一种优秀的数学研究方法,人工神经网络是人们研究常用的数学模型。两者都是近些年来发展起来的,比较先进的研究方法之一。小波分析和人工神经网络各自都具备着独特的优点。小波变换是一种时频分析方法,将时间信号变换到时间频率域,通过对时间序列的多尺度分析,更好地观察信号的时间和频率信息,有效地观察、提取信号的局部信息。人工神经网络的优点则是功能强大,如容错、记忆、自学习等。将小波分析和人工神经网络相结合,建立一种新的数学模型,就可以结合两者的优点。使之具有较强的逼近能力和容错能力,这样就能够得到较为理想的预测效果^[5]。

多尺度小波网络概念的引入使得网络结构的设计具有了一个可靠的理论指导,同时基于小波分析的方法有助于网络训练速度的加快。

平方可积空间(即能量有限空间)具有多尺度特性,而这种特性是通过不同的小波空间和尺度空间中的函数基的线性组合体现出来的。

设分类边界函数为 $f(x) \in L^2(R)$, 被分析函数的多分辨分解可看作是原函数向各尺度空间和小波空间作正交投影变换,因为所有的尺度空间 V , 小波空间 W 共同组成 $L^2(R)$ 空间,令 $f_m(x) = A_m f(x)$ 表示尺度为 m 下的 $f(x)$ 逼近,则有 $A_m f(x) \in V_m$, 由于 $\phi_{m,n}(x)$ 是尺度空间 V_m 下的正交基。因此正交基表示形式为:

$$f_m(x) = A_m f(x) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_{m,n} \phi_{m,n}(x) \quad (2)$$

同理设 $f(x)$ 在小波空间 W_m 中的投影算子为 D_m , 那么由于 $V_{m-1} = V_m \oplus W_m$, 有 $A_{m-1} f(x) = [A_m \oplus D_m] f(x) = A_m f(x) \oplus D_m f(x) \cdots$ (3)

在小波空间中, $\varphi_{m,n}(x)$ 为小波空间 W_m 的 1 组正交基, 即

$$D_m f(x) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_{m,n} \varphi_{m,n}(x) \quad (4)$$

因此式(3)可以写成:

$$A_{m-1} f(x) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_{m,n} \phi_{m,n}(x) + \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_{m,n} \varphi_{m,n}(x) \quad (5)$$

式(5)从人工神经网络的观点来看,即由尺度函数 $\phi_{m,n}(x)$ 和小波函数 $\varphi_{m,n}(x)$ 共同作为网络的

神经元激励函数,通过样本训练得到权值 $a_{m,n}$ 、 $d_{m,n}$ 。即可对 $A_{m-1}f(x)$ 进行估计。这里指的估计并非完全原函数的拟合,而是对原函数在不同空间中的投影的拟合。因为 $V_{m-1} = V_m \oplus W_m$, 相邻尺度空间内的函数投影有如下关系:

$$f_{m-1}(x) = f_m(x) + \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_{m,n} \varphi_{m,n}(x) \quad (6)$$

$$f_{m-2}(x) = f_{m-1}(x) + \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_{m-1,n} \varphi_{m-1,n}(x) \quad (7)$$

.....

$$f_0(x) = f_1(x) + \sum_{n=-\infty}^{\infty} d_{1,n} \varphi_{1,n}(x) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_{M,n} \phi_{M,n}(x) + \sum_{m=1}^M \sum_{n=-\infty}^{\infty} d_{m,n} \varphi_{m,n}(x) \quad (8)$$

根据式(8),得到多尺度小波网络的结构如图2所示。针对于工程车辆自动变速控制系统来说,研究的主要对象是液力变矩器和变速器,而变速器的挡位是主要的控制变量。 $i(i = n_w/n_b)$ 、 α 、 P 这3个参数可以描述出车辆系统的运行状态,并可以确定液力变矩器当前的工作效率。根据节能换挡理论^[6]和工程车辆4参数自动变速原理^[7],作者选用 i 、 α 、 P 这几个参数作为多尺度小波神经网络控制系统的输入变量,输出则是变速器的挡位信号。通过误差对比分析,确定隐层选用12个神经元结点,即多尺度小波网络的结构为3-12-1。

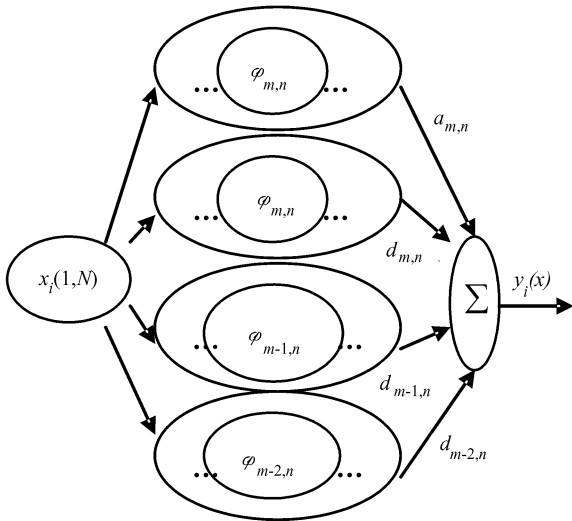


图2 多尺度小波网络结构

Fig.2 Multi-scale wavelet network structure

多尺度小波神经网络的实质是以小波基和尺度基的线性组合形式表示各个子空间,类似的小波基的组合代表着原函数空间的细节部分,而尺度基的组合形成了原函数空间的概貌部分。因此在一个训练好的多尺度小波神经网络中只令尺度激励函数起

作用,其所拟和的函数就为不含噪声干扰的原函数。

3 多尺度小波神经网络的算法

多尺度小波网络的神经元采用 m 尺度下的尺度函数 $\{\phi(2^{-m/2}t - n) | m, n \in Z\}$ 及相应小波空间中的小波函数构成网络的激励函数,其经过平移后的子函数是均匀分布在 $[-\infty, +\infty]$ 范围内的,实际训练中,采用最速下降法对多尺度神经网络进行训练^[8-11]。

使用多尺度小波网络进行函数预测时所要进行的主要步骤如下:

1) 根据实际问题的需要决定网络结构,确定对信号多尺度分解的层次,给网络连接权值赋以初值,一般给其较小的初值。

2) 确定选用哪种小波神经元激励函数,选用的小波函数必须有相应的尺度函数相对应,并将尺度函数一起选为激励函数。

3) 设置网络的最小逼近误差 ε 和最大学习次数 M 。

4) 选定学习样本并输入网络进行学习,在学习样本的过程中主要对网络的连接权值进行调整,每输入一个样本数据,计算:

$$\nabla E(W^{(k)}), H(W^{(k)}).$$

计算 λ_k , 权值调整为:

$$W_k = W_{k-1} - \lambda_k \nabla E(W_{k-1}) \quad (k = 1, 2, \dots, N).$$

其中: N 为样本总数; $H(W^{(k)})$ 为 Hessian 矩阵,设隐含层第 i 个神经元的输出数值为 H_{outi} , 于是 Hessian 矩阵可写成:

$$H(W^{(k)}) = \begin{bmatrix} H_{out1}^2 & H_{out1}H_{out2} & \cdots & H_{out1}H_{outn} \\ H_{out2}H_{out1} & H_{out2}^2 & \cdots & H_{out2}H_{outn} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ H_{outn}H_{out1} & H_{outn}H_{out2} & \cdots & H_{outn}^2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中, λ 为最佳训练步长,

$$\lambda = \frac{\nabla E(W^{(k)})^T \nabla E(W^{(k)})}{\nabla E(W^{(k)})^T H(W^{(k)}) \nabla E(W^{(k)})}.$$

5) 计算性能函数的 $E(W)$ 的值,计数器 $m = m + 1$, 如果 $E(W) < \varepsilon$ 或 $m > M$ 算法结束,否则转4)。

4 数据预处理

由于被测的工程车辆的4个参数量纲各有不同,大数据和小数据相差较大,如果将这些相差悬

殊的数据直接作用于小波网络的输入节点,那么小数据对隐函数的作用将会被大数据对隐函数的作用所淹没,隐层到输出层之间的权值调整将会变得十分困难,这样网络的收敛速度和其精度将会受到影响。为了弥补这一不足,使网络中每一个输入数据对隐函数都起作用,并且这些作用都能够充分显示出来,对原始数据进行了归一化处理^[12-14]。

具体公式为:

$$T = T_{\min} + \frac{T_{\max} - T_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}}(X - X_{\min}) \quad (10)$$

当网络训练结束后,得到的训练结果是经过归一化处理的结果,并不是想要得到的实际训练结果。因此,需要按照式(11),将训练后的输出结果还原为实际的训练结果。

$$X = X_{\min} + \frac{X_{\max} - X_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}}(T - T_{\min}) \quad (11)$$

式中: X 为原始数据; $X_{\max}$ 为原始数据的最大值; $X_{\min}$ 为原始数据的最小值; T 为变换后的数据,即目标数据; $T_{\max}$ 、 $T_{\min}$ 为目标数据的最大值和最小值,取 $T_{\max} = 2.0$, $T_{\min} = -2.0$ 。

5 实验分析

在工程车辆传动系统电控实验台上进行了实验,构造了280组数据,这些数据信息分别是工程车辆4个参数和4个前进挡位之间的相互对应关系。实验中建立了具有3级尺度的小波神经网络,选用的激励函数为二次样条小波,其尺度函数和小波函数如图3所示。

实验中结果的误差限 ε 为0.001,训练次数为1000次,再使用4×200组未学习的特征数据得到多尺度小波神经网络在数据集上的决策准确率平均值及其标准差,与遗传BP神经网络方法的决策准确率平均值及标准差比较结果如表1所示。

表1 多尺度小波神经网络和遗传BP神经网络准确率比较结果

Tab.1 Multi-scale wavelet neural network and genetic BP neural network accuracy comparison results		
	遗传BP神经网络	多尺度小波神经网络
准确率平均值/%	85.3	90.4
标准差	2.24	1.75

由表1可以看出,多尺度小波神经网络在数据集上的决策准确率平均值及其标准差优于遗传BP神经网络方法的决策准确率平均值及标准差,所以基于多尺度小波神经网络的工程车辆换挡策略具有一定的可行性。

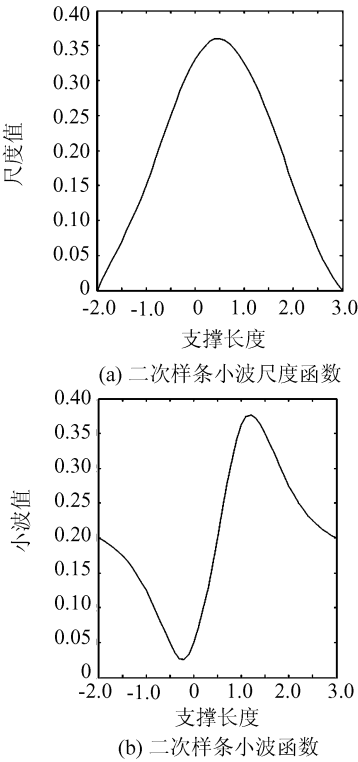


图3 二次样条小波尺度函数和二次样条小波函数
Fig.3 Two times spline wavelet scaling function and two times spline wavelet wavelet function

6 结 论

- 1) 以油门开度 α 、传动比 i 和工作油泵压力 P 为参数,提出了以提高工程车辆传动效率为目的的换挡规律。
- 2) 首次提出了基于多尺度小波神经网络的工程车辆换挡策略,并建立了多尺度小波神经网络换挡模型。
- 3) 实验结果表明,多尺度小波神经网络挡位识别的准确率平均值与标准差均优于遗传BP神经网络。能够及时准确控制变速箱自动调节挡位,保持液力变矩器工作在高效区,从而提高了工程车辆传动系的效率,对节约能源具有重要意义。

参考文献:

[1] Li Chunfu, Zheng Guangjun, Li Yanqi, et al. Study on control strategy of lockup process of torque converter[J]. Automobile Technology, 2010(10):15-17. [李春芾,郑广军,李艳琴,等.液力变矩器闭锁过程控制策略研究[J].汽车技术,2010(10):15-17.]

[2] He Ning, Zhao Zhiguo, Li Yuting. Shift schedule and simulation evaluation for dual clutch automatic transmission[J].

- China Mechanical Engineering, 2011, 22 (3): 367 - 373.
- [何宁, 赵治国, 李瑜婷. 双离合自动变速器换挡规律及其仿真评价[J]. 中国机械工程, 2011, 22 (3): 367 - 373.]
- [3] Gong Jie, Zhao Dingxuan, Chen Ying, et al. Study on shift schedule saving energy of automatic transmission of ground vehicles [J]. Journal of Zhejiang University: Science A, 2004, 5 (7): 878 - 883.
- [4] Han Sunjie, Zhao Dingxuan. Application of shift decision for automatic transmission of engineering vehicle based on multi-class classification SVM [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural, 2007 (2): 11 - 12. [韩顺杰, 赵丁选. 多类分类 SVM 在工程车辆自动变速挡位决策中的应用[J]. 农业机械学报, 2007 (2): 11 - 12.]
- [5] 王文胜, 丁晶, 李跃清. 水文小波分析 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005.
- [6] Gong Jie, Zhao Dingxuan. Study on shift schedule and auto-controlling simulation of automatic transmission [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2001, 35 (9): 930 - 934. [龚捷, 赵丁选. 工程车辆自动变速器换挡规律研究及自动控制仿真[J]. 西安交通大学学报, 2001, 35 (9): 930 - 934.]
- [7] Zhao Dingxuan. Basic principle of automatic speed adjustment of construction vehicles [J]. Construction Machinery and Equipment, 2006, 37 (9): 27 - 30. [赵丁选. 工程车辆自动变速的基本原理[J]. 工程机械, 2006, 37 (9): 27 - 30.]
- [8] 张德丰. MATLAB 小波分析 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [9] 飞思科技产品研发中心. 小波分析理论与 MATLAB 7 实现 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [10] Shen Zhixi, Huang Xiyue, Quan Xunbao, et al. Obstacle detection for intelligent vehicle based on WTMM and SVM classifier [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2008, 40 (6): 144 - 149. [沈志熙, 黄席樾, 权循宝, 等. 基于小波模极大值和 SVM 的智能车辆障碍物检测[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2008, 40 (6): 144 - 149.]
- [11] 周伟. 基于 MATLAB 的小波分析应用 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2010.
- [12] He Zhongbo, Chen Huiyan, Tao Gang. Research on the shift-decided method of the automatic transmission vehicle [J]. Vehicle Power Technology, 2002 (2): 54 - 60. [何忠波, 陈惠岩, 陶刚, 等. 自动变速车辆档位决策方法综述[J]. 车辆与动力技术, 2002 (2): 54 - 60.]
- [13] Sun Dongye, Qin Datong. Study on integrated control strategy for a continuously variable transmission system [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2003, 39 (2): 102 - 105. [孙冬野, 秦大同. 液力变矩器 - 机械无级变速器自动变速汽车综合控制策略研究[J]. 机械工程学报, 2003, 39 (2): 102 - 105.]
- [14] Wang Yan, Li Zhi. Border and coastal surveillance sound signal recognition based on the optimum wavelet packet basis [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2011, 43 (增刊 1): 151 - 154. [王艳, 李智. 基于最佳小波包基的边海防声目标识别[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2011, 43 (Supp1): 151 - 154.]

(编辑 黄小川)