

基于 RBF 网络的液压系统故障诊断方法

江苏大学 唐立平 王存堂 陈毅辉 钱帅杰

摘 要:针对液压系统的故障诊断,提出融合系统状态信息作为系统特征向量,引入 RBF 神经网络作为模式识别分类算法的智能诊断方法。并论述采用 RBF 神经网络作为分类算法的可行性及其优势。最后以电液位置伺服系统为例,建立相关的 RBF 网络,验证以上的陈述。

关键词:故障诊断 径向基函数 神经网络 模式识别

现代液压系统规模、复杂性和投资成本越来越高,有些行业的一些设备对液压系统的可靠性要求很高,但是液压系统仍然不可避免的出现故障,因此除对液压系统进行可靠性设计外,液压系统故障监测和诊断技术越来越受到重视,成为液压技术发展的一个重要方向。由于液压系统的非线性、故障机理的复杂性和多样性,因此很难准确判断复杂液压系统的故障原因、故障位置、故障程度^[1]。近年来,基于人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN)的故障诊断方法研究在国外逐步发展起来。ANN 具有的超高维性、强非线性等动力学特性,使其具有原则上容错、结构拓扑鲁棒、联想、推测、记忆、自适应、自学习、并行和处理复杂模式等功能,带来了提供更佳诊断性能的潜在可能性。其中重要的一点是 ANN 能够有效地实现输入到输出的非线性映射。由于液压系统是非线性系统,而且难以建模,用本身就是非线性映射的 ANN 来映射难以建模的非线性系统恰好解决了这一难题。

1 液压系统故障诊断模式识别问题的提出

对于复杂的液压系统,其故障原因和位置的信息量很大,很难通过建模来定性定量分析。在液压系统的某一状态下,在液压系统几个代表性的位置处获取信息(比如压力、流量、温度、频率等),把这些信息综合起来作为一个特征向量,并要求这个特征向量对液压系统的状态是一一对应的,这样我们可以把液压系统用特征向量空间的向量点来表示。对时间连续的液压系统的特征向量点在空间可能是一条连续的曲线。但由于信息采样时间的原因,使得它离散化,成为空间中许多的离散点。判断液压系统故障的思想就是寻找特征空间的一组曲面,每一个曲面将空间二分,这样特征空间被这组曲面划分成若干

区域,分别对应液压系统正常工作和不同故障的情况。根据特征向量点所处的区域不同来判断液压系统的状态。要实现这个方法必须解决两个问题:

- (1)特征向量的选取;
- (2)如何确定分离曲面使向量线性可分。

综上所述,对液压系统故障诊断就是一个模式识别问题,可以认为以上过程就是模式从模式空间到类别隶属空间的正确映射。神经网络在这方面有着突出的优势,它经过训练可有效的提取液压系统的特征,实现模式分类,径向基函数网络就是其中之一。

2 径向基函数网络(Radial Basis Function, RBF)理论

基本的径向基函数网络(如图 1)包括 3 层,其中每一层都有着完全不同的作用。输入层 $X=[x_1, x_2, \dots, x_{m-1}, x_m]^T$,由一些源点(感知单元)组成,它们将网络与外界环境连接起来,第二层是一个隐层,它的作用是从输入空间到隐藏空间之间进行非线性变换。

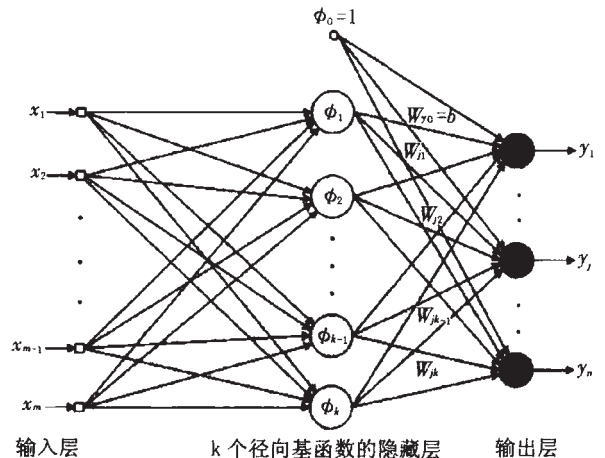


图 1 径向基函数网络基本结构

它一般具有较高的维数,因为根据模式可分性的 Cover 定理,将复杂的模式分类问题非线性地投影到高维空间将比投影到低维空间更可能是线性可分的。权值矩阵:

$$W = \begin{bmatrix} W_{10} & W_{20} & \dots & W_{lk-1} & W_{lk} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ W_{j0} & W_{j1} & \dots & W_{jk-1} & W_{jk} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ W_{n0} & W_{n1} & \dots & W_{nk-1} & W_{nk} \end{bmatrix}$$

第三层就是输出层 $Y=[y_1, y_j, \dots, y_n]^T$,神经元个数根据输出的需求来定。

我们对神经网络单层感知器的研究中得到这样一个结论:一旦模式具有线性可分性,则相应的分类问题就容易解决。现在有 N 个 m 维模式(向量) X_1, X_2, \dots, X_N 的集合 Φ ,对于每一个模式 $X \in \Phi$,定义由一组实函数 $\{\varphi_i(X) \mid i=1, 2, \dots, k\}$ 组成的向量表示如下:

$$\varphi(X) = [\varphi_1(X), \varphi_2(X), \dots, \varphi_k(X)]^T \quad (1)$$

假设模式 X 是 m 维输入空间的一个向量,则向量 $\varphi(X)$ 将 m 维输入空间的点映射到新的 k 维空间的相应点上。我们将 $\varphi(X)$ 称为隐藏函数,相应由隐藏函数生成的空间称为隐藏空间或者特征空间^[2]。现在我们讨论一个简单的分类情况,就是关于 Φ 的二分 $\{\Phi_1, \Phi_2\}$,如果存在一个 k 维的向量 W ,使得

$$\begin{aligned} W^T \varphi(X) &> 0, & X \in \Phi_1 \\ W^T \varphi(X) &< 0, & X \in \Phi_2 \end{aligned} \quad (2)$$

那么由方程

$$W^T \varphi(X) = 0 \quad (3)$$

定义的超平面就是特征空间中的分离曲面,这样就将一组 m 维空间模式由非线性的不可分变成了线性可分。对于复杂的分类情况也是同样的原理,寻找一组这样的超平面。通常 $\varphi(X)$ 取 Gauss 函数,这样只要确定 W 权值系数矩阵就可以确定分离曲面。 W 权值系数矩阵的确定取决于网络训练的数据和学习算法。

RBF 网络的设计思想与前一节的液压系统故障诊断思想是一致的。对液压系统的特征向量可以二分为无故障(Φ_1)和有故障(Φ_2)两个空间,寻找由(3)式确定的曲面。同样可以把有故障空间再二分为

故障 1 和非故障 1 两个空间,不断细分后,空间被一组曲面划分为无故障和故障 1、2、3、……、 n 共 $n+1$ 个空间。结论:存在这样的空间(隐藏空间),把液压系统特征向量映射到该空间,同时定义了一组分离曲面实现模式识别。为了具体验证该方法的可行性及效果,下面以典型的电液位置伺服控制仿真系统为例进行探讨。

3 电液位置伺服控制仿真系统故障模式

电液位置伺服系统,主要由一个伺服阀、液压缸和恒流液压泵组成。伺服阀的实际动态特性与供油压力、输入信号幅值、油温、环境温度、负载条件等许多因素有关。但从控制观点来看,伺服阀是一个高度复杂的装置,具有高阶的非线性动态特性^[3]。为了简化分析,并考虑到具有较好的等效精度,该伺服阀采用二阶振荡环节的传递函数,如下:

$$\frac{Q(s)}{K(s)} = K \left[\frac{1}{T_s^2 s^2 + 2T_s a_s s + 1} \right] \quad (4)$$

式中: T_s ——时间常数, $T_s = \frac{2\pi}{\omega_n}$ (ω_n 是伺服阀固有角频率)

a_s ——阻尼系数,一般为 0.5~1.0

s ——拉氏变化因子

对于液压伺服环境中的液压缸,忽略活塞运动时的干摩擦力,并且认为活塞与缸体之间的干摩擦系数为 0^[4],不计缸的外泄漏后,则液压缸的传递函数可以写成如下式子:

控制传递函数

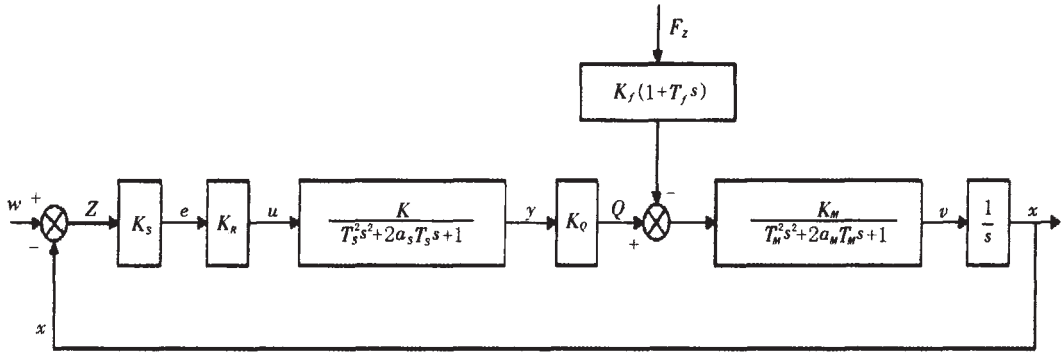
$$F_L(s) \frac{X(s)}{Q(s)} = \frac{1}{s} \frac{K_M}{sT_M^2 s^2 + 2a_M T_M s + 1} \quad (5)$$

干扰传递函数

$$F_L(s) \frac{X(s)}{F_L(s)} = -\frac{1}{s} \frac{K_f K_M (1 + T_f s)}{sT_M^2 s^2 + 2a_M T_M s + 1} \quad (6)^{[5]}$$

因此整个电液伺服系统的框图如图 2 表示。

参数 K_s, K_R, K 的乘积取 0.012, K_O 和 K_M 的乘积取 2500, T_s 取 0.015 s, a_s 取 0.8, T_M 取 0.010 5 s, a_s 取 0.1, μ 取幅值为 0.3 m, 频率为 2 Hz 的正弦信号,扰动负载为阶跃信号,幅值 220 N,正常工作下的曲线如图 3。



w ——表示位置的期望值 z ——位置偏差 e ——敏感元件输出电压 u ——电液伺服阀输入电流
 y ——伺服阀芯的开度 Q ——伺服阀的流量 v ——液压缸活塞的速度 x ——液压缸活塞的位置 K_s ——位置偏差敏感元件的增益 K_R ——放大器的增益 K ——伺服阀的放大系数 T_s, a_s ——伺服阀的时间常数和阻尼比 K_Q ——滑阀的流量增益 K_M, T_M, a_M ——液压缸的放大系数、时间常数、阻尼比 F_z ——负载扰 K_f, T_f ——负载扰动的放大系数和微分时间常数

图 2 电液位置伺服控制框图

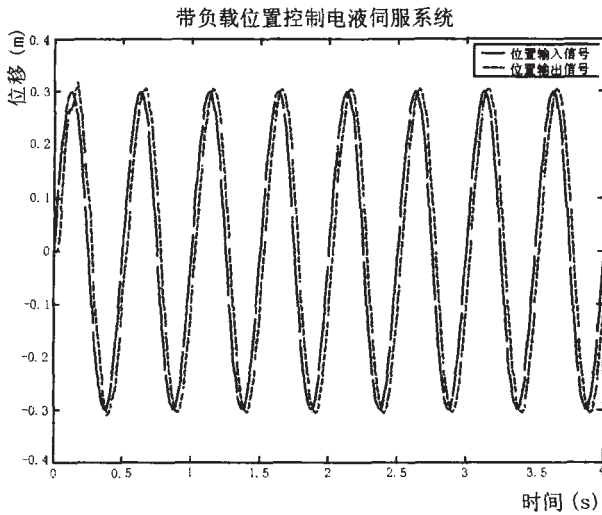


图 3 位置信号输入输出曲线

在这个系统中，只对电液伺服阀的故障进行分类判别，液压缸故障的判别方法可以参考伺服阀。将电液伺服阀分成 6 种故障情况，分别是伺服阀的传递函数的放大系数 K 过大或过小，时间常数 T_s 过大或过小，阻尼比 a_s 过大或过小。故障曲线如图 4 所示，可以看出该液压系统正常和不同故障下的位置响应曲线各自不同。由离散化的系统位置响应表示系统的状态，通过 RBF 训练网络确定 6 个分离曲面（确定 W 权值系数矩阵），把系统状态分成 7 个对应的状态空间。

4 网络建立及模式识别

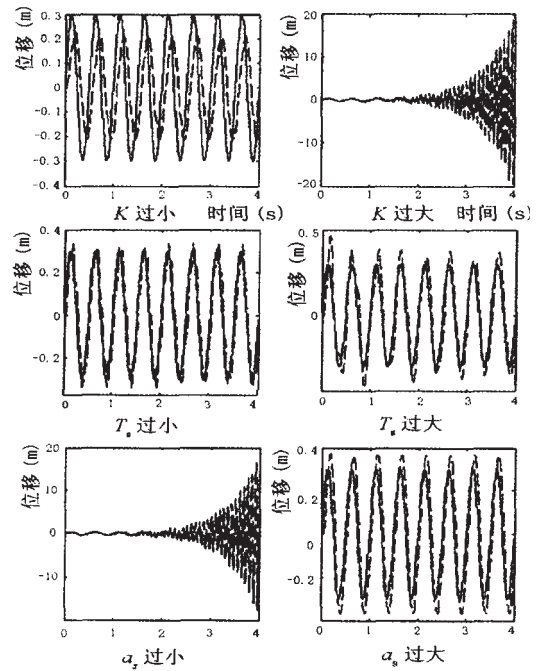


图 4 6 种故障模式曲线

基于以上分析，以液压缸的实际位置作为神经网络的特征向量输入，以 6 种故障模式分类加上正常情况作为输出。考虑到应用于模式识别，故选择径向基概率神经网络(RBPNN)，它是在径向基函数神经网络(RBFNN)和概率神经网络(PNN)的基础上发展起来的一种新型的前馈神经网络(FNN)模型。该网络模型吸收了径向基函数神经网络和概率神经网络的优点，即充分考虑了模式识别应用时的多类别

模式间的交错影响,从而形成有效的分界面,特别是这种新的模型具有计算复杂度低、收敛速度快等优点。

取 Gauss 函数接受域为 0.1。取 $K=0.004, 0.006, 0.008, 0.01, 0.012, 0.014, 0.016, 0.018, 0.020, 0.022$ (0.01~0.016 为正常), $T_s=0.005\text{ s}, 0.01\text{ s}, 0.015\text{ s}, 0.020\text{ s}, 0.025\text{ s}, 0.03\text{ s}$ (0.015 s, 0.020 s 为正常) $\mu_s=0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0$ (0.7, 0.8 为正常), 从 0 到 1.5 s 每 0.05 s 采集液压缸活塞的位移输出, 经过数据的预处理和归一化后作为网络的训练输入, 确定对应的期望输出如表 1。

输入相应的训练数据时输出识别正确率达到 100%, 但是输入检测数据时, 正确识别率只有 53% 左右, 调整输入向量的维数后也只达到 61%, 低维数和较高维数的识别率分别只有 33% 和 35%, 可见其存在一个最佳的输入维数。在这个试验中, RBF 网络的泛化能力不高, 训练样本中可能没有完整重建输入—输出映射所需的足够信息, 因此要求大量的试验数据。

5 结束语

径向基函数网络(RBFNN)在分类能力和学习速度上比误差反向传播网络(BPNN)要好, 基于以上的训练数据, BP 网络的训练运算时间很长, 分类时要依靠经验去设定阈值, 从这两点来说, 对于液压系统故障诊断, RBF 网络要优于 BP 网络。将 RBF 网络应用于液压系统故障诊断是网络自身的结构、

表 1 期望输出表

| 系统状态 | 正常 | K 过大 | K 过小 | T_s 过大 | T_s 过小 | a_s 过大 | a_s 过小 |
|------|----|--------|--------|----------|----------|----------|----------|
| 期望输出 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |

算法思想与故障识别的思想有一致性, 通过仿真实验也论证了这一点。

参考文献

- 姜万录, 王益群, 孔祥东等. 液压系统故障检测与诊断技术的新进展. 中国机械工程, 1998(9)
- 叶世伟, 史忠植(译). 神经网络原理(Neural Networks A Comprehensive Foundation, Second Edition). 北京: 机械工业出版社, 2004
- 雷天觉. 新编液压工程手册. 北京: 北京理工大学出版社, 1998
- 李永堂, 雷步芳, 高雨茁. 液压系统建模与仿真. 北京: 冶金工业出版社, 2003
- 蔡廷文. 液压系统现代建模方法. 北京: 中国标准出版社, 2002
- 戴葵(译). 神经网络设计(Neural Network Design). 北京: 机械工业出版社, 2002
- 殷勤业, 杨宗凯, 谈正. 模式识别与神经网络. 北京: 机械工业出版社, 1992
- 范影乐, 杨胜天, 李轶. Matlab 仿真应用详解. 北京: 人民邮电出版社, 2001

通信地址: 江苏镇江 江苏大学 772 信箱(212013)

(收稿日期 2005-05-25)

2005 年中国工程机械配套件行业年会在南昌召开

2005 年 9 月 26~28 日中国工程机械配套件行业年会在江西南昌召开。中国工程机械工业协会顾问朱章源宣读了协会名誉理事长杨红旗向大会发来的贺词, 年会协办单位江西南特工程机械(集团)有限公司总经理熊伟致欢迎词。中国工程机械工业协会副秘书长陆学文、挖掘机械分会秘书长陈正利和铲土运输机械分会秘书长陈凯运到会祝贺并发表了热情洋溢的讲话。

中国工程机械工业协会配套件分会秘书长马传伟作了题为“走出困境, 寻求出路, 继续发展”的专题报告。报告总结了 2004 年和 2005 上半年配套件行业的经济运行和进出口情况, 分析了配套件产品在国内外市场中的销售状况, 以及钢材等原材料涨价对配套件行业的影响, 提出了配套件行业持续、健康、稳定发展的有关对策和建议。

徐州市人大常委会原副主任李志昌、广西柳工机械股份有限公司刘良臣等专家以及部分企业代表就业内人士普遍关注的问题作了专题讲话。与会代表围绕国内两个配套件市场(直接为主机制造商配套市场和用户维修配件市场)以及如何推进产品出口等问题进行了广泛的交流和探讨。大会一致通过了“工程机械配套件供应商南昌宣言”。会议期间, 代表们还专程参观了南特(集团)公司的斗齿等耐磨件和小型液压挖掘机生产车间。 (贾工)

Keywords:R/D conversion D/R conversion

Asynchronous serial communication DDK

Analysis on Design Parameters of Crawler Travel Mechanism on Cold Pavement Milling Machine

On the basis of analyzing the work principle of crawler travel mechanism on cold pavement milling machine, formulas to calculate traction force and input power of the mechanism are presented. Design principle for drive sprocket, track rollers and idler are offered in the article.

Keywords: Milling machine Crawler travel mechanism Design Parameter

Determination of Design Parameters of Rubber Damping Pad on Elastic Suspension of Dozers

To equip elastic suspension on a crawler dozer can effectively dampen vibration and shock in its travel mechanism. Aiming at the viscoelastic characteristics of rubber materials, methods to select materials for rubber pads are analyzed and rational selection of design parameters of damping pads is studied. The result is applied to the design of damping rubber pads on elastic suspension of large-sized crawler type bulldozer.

Keywords:Bulldozer Elastic suspension Damping rubber pad

Conditions and Loads Analysis for the calculation of Metal Structures of Model TLJ900 Bridge Erector

Various conditions to calculate metal structures of TLJ900 bridge erector are analyzed. Calculation loads on the bridge erector under various conditions are expatiated. Structure calculation for front outrigger is completed.

Keywords:Bridge erector Load combination Calculation condition

A Discussion on the Selection of Weighing Sensors on Mixing Equipment

The basic requirements on weighing system of concrete mixing equipment are described and work conditions of weighing sensors are listed. Work principle and structure styles of common weighing sensors on mixing equipment are analyzed. Some factors to be considered when selecting sensors are pointed out. It is suggested that the sensors should be selected according to the types and scopes of mixing equipment.

Keywords:Model selection Sensor Mixing equipment Weighing system

Progress on the Sealing of Piston Rods in Hydraulic Cylinders of Construction Machinery

What discussed in the article is mainly on 4 aspects: identification of lubricating conditions, sealing mechanism, finite element

calculation for contact stresses and failure mechanism of sealing. It is pointed out that the dynamic sealing performance of piston rods is determined by respective speed in inward and outward strokes and the highest pressure gradient. Finite element solution of the pressure gradient is the key to calculate leakage.

Keywords:Piston rod Sealing Lubrication Finite element Failure

Failure Diagnostic Methods for Hydraulic Systems Based on RBF Network

Aiming at the failure diagnosis for hydraulic systems, an intelligent diagnostic method that takes system condition information as system eigenvector and applies RBF neural network as classification algorithm for model recognition is suggested. Feasibility and advantages when using RBF neural network as classification algorithm are discussed. Lastly, taking an electro-hydraulic position servo system as an example, related RBF network is set up to verify the above statement.

Keywords: Failure diagnosis Radial base function Neural network Model recognition

Methods of Lathing Long and Thin Shafts

Factors influencing machining accuracy of thin and long shafts are discussed. Measures to increase the accuracy are expatiated from the aspects of clamping method, cutter angle, feeds as well as new machining processes.

Keywords:Thin and long shaft Lathing Machining accuracy

Methods of Machining Typical Bevel Gear Seat

There are two special dimensions in a typical cross hole component in idler wheel of concrete trailer pump-gear seat. It is difficult to measure during machining process and to ensure machining accuracy. According to its machinability and benchmark feature, it is machined through two procedures on a lathe and a boring machine. A spindle and positioning plate are used to position it. Dimension chain conversion is also applied. The result reaches the requirements of machining accuracy of bevel gear seat.

Keywords:Machining Process Gear seat

A Research on Optimal Design of Plane Layout for the Logistic System in Manufacturing Industry

With equivalent logistic algorithm, an optimal design is conducted on plane layout for manufacturing logistic system, which diminish overlap and return during the transportation process of production materials to reduce production cost and to serve the practical application of enterprises.

Keywords:Logistics Plane layout Optimization