

一种 ANN 与 ES 功能互补的故障诊断方法*

骆德汉**

(合肥经济技术学院机电系 合肥 230052)

【摘要】 根据人工神经网络(ANN)和专家系统(ES)的各自特点,建立一种人工神经网络与专家系统相结合的功能互补式设备故障诊断模型。提出将设备故障分为低层故障和高层故障,用 ANN 对设备低层故障进行诊断,用 ES 对设备高层故障进行诊断的新方法,并以 MK9-5 卷接机组为对象,进行了实验研究,取得了较好的效果。

关键词 设备故障诊断; 人工神经网络; 专家系统; 高层故障; 低层故障

中图分类号 TP18; TP306.3

专家系统 ES (Expert System)在设备故障诊断中已得到了深入研究并获得了初步应用^[1,2],然而,目前研究表明,设备故障诊断专家系统应用于复杂设备故障诊断时已遇到知识获取的“瓶颈”、自学习和知识的“循环递推”等问题。为了找到解决上述问题的途径,基于人工神经网络 ANN(Artificial Neural Network)的设备故障诊断方法受到人们的重视^[3,4]。但仅用人工神经网络对设备故障进行诊断存在推理过程不清楚、各子网络之间不易协调、控制和诊断结果解释机制不强等问题。因此,近年来出现了将神经网络和专家系统相结合的研究报道^[5],即利用 ANN 和 ES 各自的特点,使它们功能互为补充,克服了 ES 和 ANN 各自所遇到的问题。本文提出一种将设备故障分为低层故障和高层故障,用 ANN 对设备低层故障进行诊断,用 ES 对设备高层故障进行诊断的新方法;给出一种人工神经网络与专家系统相结合的功能互补式设备故障智能诊断模型^[6,7]。介绍了设备低层故障和高层故障模型建立的基本概念和方法;讨论了人工神经网络 ANN 和专家系统 ES 相结合的故障诊断系统的建造。并以 MK-95 卷接机组为对象,给出了基于上述方法的实验研究结果。

1 设备故障层次化分析

1.1 设备结构的块化模型

复杂设备可认为是由不同种类“元素”按一定规律聚合而成的系统,系统的“元素”可以是子系统,子系统的“元素”可以是更深层次的子系统,如此类推,直至“元素”表示为某一具体物理零器件。据此,复杂设备的构造可抽象为一个如图 1 所示的多层块化结构模型。我们可作如下定义:

定义 1 系统构成 $SC = (BC, BR, SF)$ 为三元组。

SC (System Construction): 系统构成; BC (Block Construction): 系统结构块的有限集合; BR (Block Related): 结构块的关联功能有限集合; SF (System Function): 系统输出功能的有限集合。

定义 2 结构块 $BC = (Bin, Be, Bout)$ 为三元组。

BC: 某结构块构成; Bin (Block Input): 结构块输入功能的有限集合; Be (Block Element): 结构

1997年11月21日收稿

* 高等学校博士基金资助项目

** 男 39岁 博士 副教授

块内元素的有限集合; Bout (Block Output): 结构块输出功能的有限集合。

由以上定义可知,系统构成包含了系统结构块、结构块之间的关联功能和系统输出功能。当设备发生某一故障时,则使结构块功能失调,在相应结构块上必有相应故障征兆出现,分析故障征兆与结构的关系可对设备故障进行诊断。

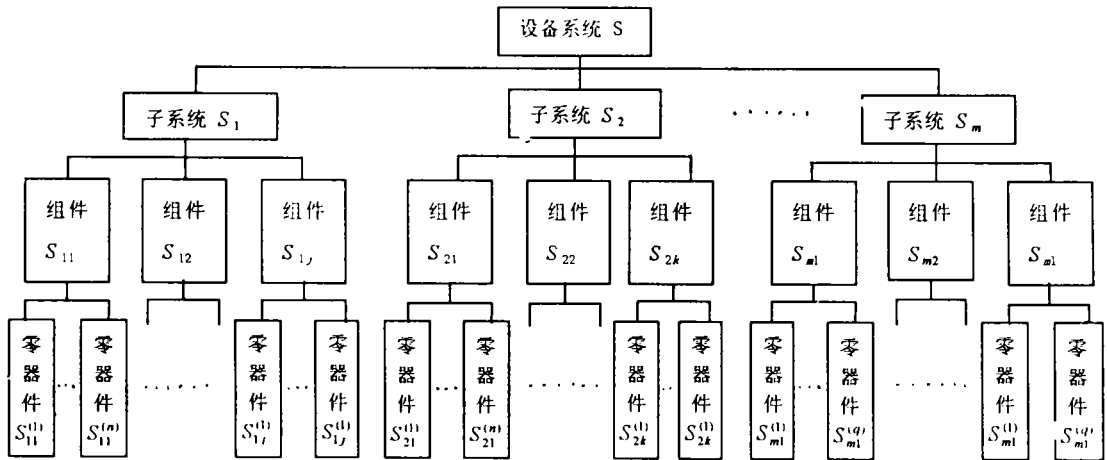


图 1 设备结构的块化模型

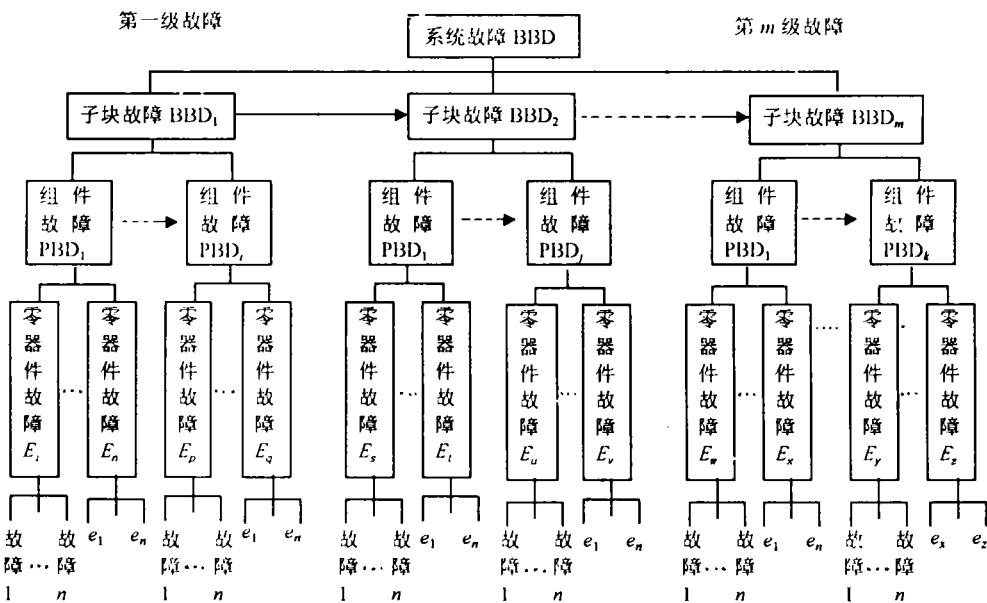


图 2 设备故障层化模型

1.2 设备故障层化模型

设备故障可根据设备结构块化模型进行分层,即可将设备故障分为系统层故障、子块层故障、

组件层故障、零器件层故障,如图 2 所示。由此,我们可作如下定义:

定义 3 器件故障 e 为设备中某器件劣化或功能失调。

定义 4 零器件层块故障 $E = \{e_g\}(g = 1, 2, \dots)$, E 为某零器件故障的有限集合, e_g 为 g 类故障。

定义 5 组件层块故障 $PBD = \{E_i\}(i = 1, 2, 3, \dots, h)$, PBD (Parts Break Down)为某组件块故障的有限集合。 E_i 为零器件 i 故障的有限集合, h 为组件块内的零器件数。

定义 6 子块层块故障 $BBD = \{PBD_j, RPBD_{jk}\}$ 为二维有限集合, BBD (Block Break Down)为子块层某块故障, PBD_j 为组件块 j 的故障集合, $RPBD_{jk}$ (Related Parts Break Down)为组件块 j 和组件块 k 之间的关联故障集合。

定义 7 系统层故障 $SBD = \{BBD_p, RBBD_{pq}\}$ 为二维有限集合, SBD (System Break Down)为系统层故障, BBD_p 为子块层内结构块 p 的故障的集合, $RBBD_{pq}$ 为结构块 p 和结构块 q 之间的关联故障的集合。

由以上可知,系统层故障主要是由某个子系统的某些故障引起的;子块层故障是由组成子块的各组件的某些故障引起的;组件层故障是由组成该组件块中的某些零器件的故障引起;零器件层故障是指各物理器件可能发生的故障。

2 ANN 和 ES 相结合的诊断系统

2.1 前馈网络 MFNN 故障诊断模型

多层前馈网络 MFNN(Mulit-layer Feed-Forward Neural Network) 如图 3 所示,它是众多 ANN 模型中应用最广的网络之一,具有较强的模式分类能力,能实现从 R^n 到 R^m 的映射,并在实现输入输出的映射关系时能获得满意的收敛精度。因此, MFNN 是一个较理想的设备故障诊断模型,它由一个输入层、一个或多个隐层和一个输出层构成。网络前一层每个神经元的输入是后一层神经元的加权和。即有

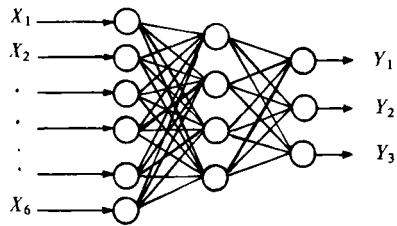


图 3 MFNN 网络的拓扑结构

$$\begin{cases} O_j^k = X_j & k = 1 \quad \text{输入层 } \forall j \\ O_j^k = f(\sum_i W_{ij}^k O_i^{k-1} - \theta_j^k) & k < T \quad \text{隐层 } \forall ij \\ O_j^k = f(\sum_i W_{ij}^T O_i^{T-1} - \theta_j^T) & k = T \quad \text{输出层 } \forall ij \end{cases} \quad (1)$$

式中 W_{ij} 是第 k 层第 j 个神经元与第 $k-1$ 层第 i 个神经元的联接权值; θ_j^k 是第 k 层第 j 个神经元阈值; T 为网络层数; f 为神经元的激发函数,通常取 sigmoid 函数。当输入层有 n 个神经元,输出层有 m 个神经元, MFNN 可以实现从 n 维输入向量到 m 维输出向量的非线性映射 $R^n \rightarrow R^m$ 。对于有 Q 个样本集合 $\{X_p, Y_p\}(P = 1, 2, \dots, Q)$, X_p 为样本 P 的 n 维输入向量, Y_p 为样本 P 的 m 维输出向量,若将该集合 $\{X_p, Y_p\}$ 作用于 MFNN 时, MFNN 通过学习可求得一映射函数 M ,从而实现

$$M: R^n \rightarrow R^m \quad Y_p = M(X_p) \quad P = 1, 2, \dots, Q \quad (2)$$

MFNN 在实现上述映射时,输入输出层的神经元个数由映射向量的维数确定,隐层数及每隐层的神经元个数与映射集合的样本数 Q 有关。 MFNN 的训练学习方法大多采用误差反向传播方法 EBP(Error Back Propagation)。

2.2 ANN 和 ES 相结合的故障诊断模型

ANN 和 ES 相结合的设备故障诊断系统的结构模型如图 4 所示,它由数据采集处理模块、低层故障诊断模块、高层故障诊断模块和故障解释与处理模块等构成。数据采集处理模块是一个包含由下位机构成的数据采集和信号处理子系统;低层故障诊断模块由多个人工神经网络 ANN 组成;高层故障诊断模块由推理诊断专家系统构成;故障解释与处理模块是对推理机所得到的确认结果进行解释,分析故障产生的原因,指出故障发生的部位,并给出解决该故障的策略和方法。

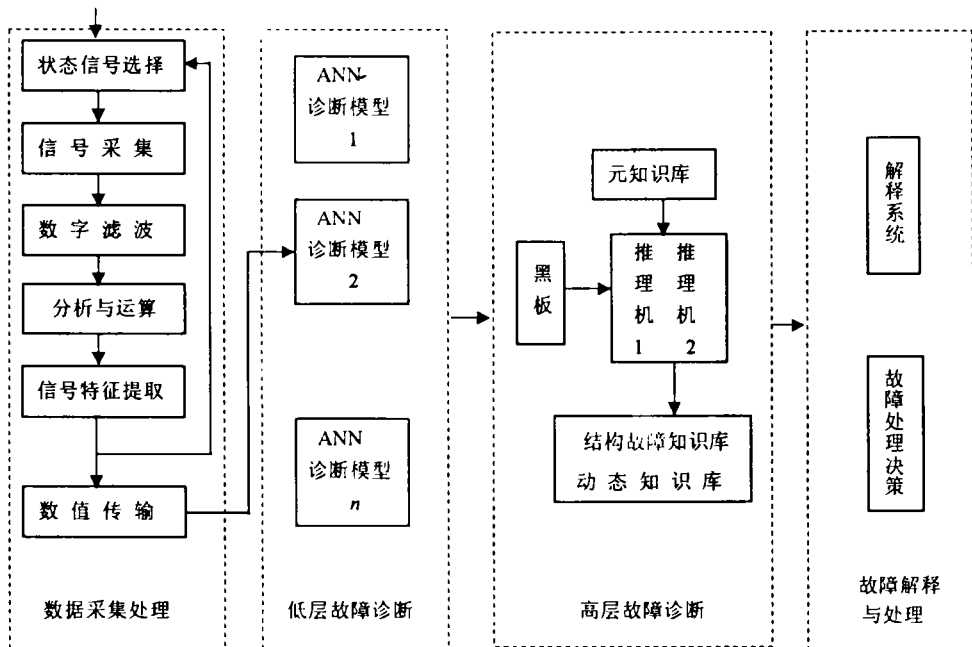


图 4 ANN 和 ES 结合的诊断系统结构

3 实验研究

为了使诊断系统有较高的诊断效率和可靠性,结合故障层化模型和诊断模型的特点,采用了分级、分块的知识组织策略。分级组织是根据知识在诊断系统中的作用特点,将知识分为零级知识、目标级知识和元级知识;分块组织是根据设备故障与设备结构的关系,将设备故障知识分成若干块。在本系统中,零级知识分为电动故障块零级知识和机械故障块零级知识。其中电动故障块的故障与征兆样本空间为: $\{(0,0,0,0,0,0,0,0,0);(0,0,0,0,0,1,0,0,1);(0,0,0,0,1,0,0,1,0);(0,0,0,1,0,0,0,1,1);(0,0,1,0,0,0,1,0,0);(0,1,0,0,0,0,1,0,1);(1,0,0,0,0,0,1,1,0)\}$,它由六维特征输入向量和三维故障输出向量组成的样本集合表示,样本空间由七个样本向量构成,每一向量表达一种征兆与电动故障的映射关系;机械故障块的征兆—故障样本为: $\{(0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0);(0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,1);(0,0,0,0,0,0,1,0,0,0,1,0);(0,0,0,0,0,1,0,0,0,0,1,1);(0,0,0,0,1,0,0,0,0,1,0,0);(0,0,0,1,0,0,0,0,0,1,0,1);(0,0,1,0,0,0,0,0,0,1,1,0);(0,1,0,0,0,0,0,0,0,1,1,1);(1,0,0,0,0,0,0,0,1,0,0,0)\}$ 它由八维特征输入向量和四维故障输出向量组成的样本集合表示,样本空间由九个样本向量构成,每一个向量表达一种征兆与对应的机械故障映射关系。零级知识供诊断系统的 ANN 学习并被存储在 ANN 网络的权值上。

目标级知识是用来表达设备高层故障知识,它是在设备低层故障诊断基础上,根据设备故障横向、纵向传播的特点进行分析归纳的一种符号型知识。以 MK9-5 机组为例,可按如下产生式规则来组织目标级故障知识:

MC-RULE 100 IF <MK9-5 结构故障> OR <PA8-5 结构故障> OR <CID 结构故障>
THEN <MK9-5 机组结构故障>

MC-RULE 120 IF <M 机械故障> OR <M 电气故障> THEN <MK9-5 结构故障>

PF-RULE 140 IF <P 机械故障> OR <P 电动故障> THEN <PA8-5 结构故障>

CC-RULE 160 IF <C 机械故障> OR <C 电气故障> THEN <CID6 结构故障>

元级知识是指导对目标级知识的搜索和推理机工作的知识,也是关于实现故障诊断、故障解释及处理的知识。

4 故障诊断过程

ANN 和 ES 相结合的互补式设备故障诊断系统的诊断过程如图 5 所示。它完成设备状态信号的检测及处理、故障的诊断与验证和故障的解释等工作。

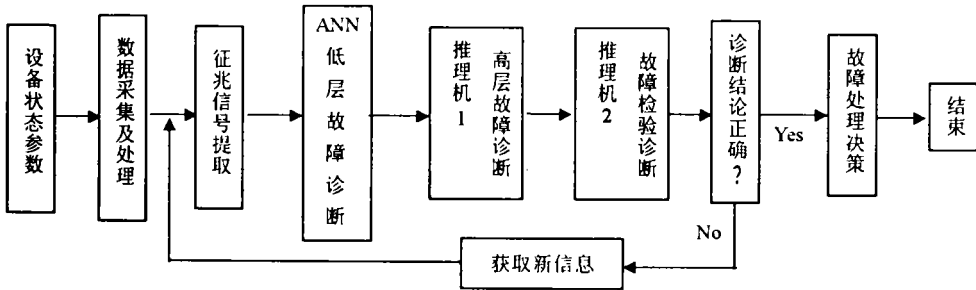


图 5 ANN 和 ES 互补式诊断过程

4.1 基于 ANN 的低层故障诊断

MK9-5 卷接机组低层电动故障和机械故障的诊断分别采用两个三层前馈网络诊断模型实现。网络输入层的某个神经元为 1,表示一种故障征兆,网络输出层所对应的输出为十六进制数,表示相应的故障编号。诊断前将样本空间的各向量分别加入各自网络的输入层和输出层,使网络对其学习,网络完成学习达到稳定后,则低层故障知识即被存储在各自网络的权值上。诊断时,输出向量通过 ASCLL 码的转换,将故障以符号型表示的方法供专家系统进行高层故障推理诊断。

4.2 基于 ES 的高层故障诊断

高层故障诊断以低层故障诊断结果为基础,推理机 1 接收到某个 ANN 模型输出结果后,结合目标级故障知识进行推理诊断,得到高层故障的假设结论。若假设故障被确认,元知识启动推理机 2,从假设的结论出发,再度利用目标级故障知识进行反向推理诊断。若此时推得的低层故障与 ANN 诊断的低层故障一致,则低层故障被确认,并将该低层故障编号送到解释模块,若反向推得的结论与 ANN 诊断的低层故障不一致,则说明设备已发生高层故障,但又不是或不仅是由 ANN 所诊断的低层故障所致,因此设备可能发生疑难故障或多因故障,这时转入新信息获取程序,从人机接口获取相应的补充信息后,重新启动诊断,以便在新增信息支持下,达到正确诊断的目的。

4.3 故障解释与处理决策

当设备低层故障被确认后,故障解释模块指出该故障可能出现的原因和故障发生的部位;系统

处理决策模块集专家知识和经验于一体,给出解决故障的相应办法。

5 结 论

本文探讨了 ANN 和 ES 相结合的功能互补式设备故障智能诊断新方法,并以 MK9-5 机组为对象进行了实验研究。实验结果表明,本文提出的思想和相应的实现方法是可行的,能利用 ANN 和 ES 各自的优点进行互补,较好地克服故障诊断专家系统和人工神经网络各自存在的问题,具有较好的诊断效率和可靠性,并显示出一定的实用研究价值。

参 考 文 献

- 1 郑小军,杨叔子. 汽车发动机诊断专家系统 AEDES. 自动化学报,1990,16(5):393~399
- 2 张 杰,张素贞. 故障诊断专家系统在 PET 聚合工段中的应用. 控制与决策,1993,8(1):73~76
- 3 Paya B,Badi M N M. Fault classification in gearboxes using neural network. ETCT - 96, Symposium of Structural Dynamics/Vibration, Houston ASME,1996:167~174
- 4 Harris T. Neural networks and their application to diagnostics and control. Proceedings of 4th International Congress on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management (COMADEM), Nimes, France, 1992
- 5 张 景,李人厚. 联合使用专家系统与人工神经网络的智能控制系统. 全国智能控制与适应控制理论与应用研讨会论文集,西安,1992
- 6 骆德汉. 基于人工神经网络设备故障在线诊断专家系统的研究.[博士论文].合肥:合肥工业大学,1995
- 7 骆德汉,陈心昭. 基于人工神经网络的设备故障诊断策略及模型研究. 合肥工业大学学报,1995(1):28~34

An Approach of Fault Diagnosis Combining Expert System with Artificial Neural Network

Luo Dehan

(Dept. of Mechanical and Electrical Eng., Hefei Institute of Economics and Technology Hefei 230052)

Abstract In this paper, the model-blocked of device structure and model-layered of faults diagnosed device are discussed. A new intelligent diagnostic model which combines artificial neural networks (ANN) with expert system (ES) is developed. Its knowledge base, knowledge representation, and knowledge acquisition are emphatically studied, and the diagnosing process is described. The tests are carried out in the laboratory on MK9-5 cigarette machine. The experimental results show that the new intelligent diagnostic approach has higher effectiveness and liability than the common diagnostic expert system. It is expected to be further developed and improved to be applied in practice.

Key words device fault diagnosis; artificial neural networks; expert system; high layered faults; low layered faults.

编辑 黄 辛