

# 基于 BP 网络和专家系统的铝电解槽分层故障诊断

丁立伟<sup>1</sup>, 聂婷<sup>2</sup>, 李婷<sup>2</sup>

(1. 兖矿科澳铝业有限公司, 山东 邹城 273500; 2. 中国矿业大学 信息与电气工程学院, 江苏 徐州 221008)

**摘要:** 针对铝电解槽故障种类繁多和不易诊断的问题, 设计了基于 BP 网络和专家系统的分层故障诊断系统, 包括前层分类和后层预报; 通过对槽电阻信号的频谱分析, 提取了故障特征信息, 并对故障进行分类; 建立了基于 BP 网络的前层分类器, 用于诊断特征显著的故障; 制定了故障诊断和控制规则, 完善了专家系统的知识库, 根据前层分类结果对余下故障进行诊断; 通过制定规则, 将前层分类和后层预报相结合, 实现了故障诊断系统的整体设计; 仿真结果及理论分析表明, 该系统可有效预报单一及复合故障, 提高故障诊断的准确率, 保证铝电解槽工作状况的稳定。

**关键词:** 铝电解槽; 故障诊断; BP 神经网络; 专家系统; 分层

## Aluminum Cell Hierarchical Fault Diagnosis Method Based on BP Network and Expert System

Ding Liwei<sup>1</sup>, Nie Ting<sup>2</sup>, Li Ting<sup>2</sup>

(1. Yankuang Keao Aluminum Co. Ltd., Zoucheng 273500, China;

2. School of Information and Electrical Engineering, CUMT, Xuzhou 221008, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of great variety and diagnostic difficulty of the aluminum cell' fault, a layered fault diagnosis expert system based on BP neural network and expert system was designed, which included former layer classification and after layer prediction. Based on the analysis for the frequency spectrum of the cell resistance signal, the fault feature information was extracted to classify the fault. A former layer classifier based on BP network was established to diagnose the obvious features of faults. Furthermore, with fault diagnosis rules and control rules as well as the consummate knowledge of expert system, the remaining fault was diagnosed according to the former layer classification results. The overall design of fault diagnosis system was achieved by setting the rules and combining the former layer classification and after layer prediction. The simulation results and theoretical analysis show that the system can effectively forecast the single and compound fault and then improve the diagnostic accuracy, ensure the working conditions of the aluminum cell.

**Keywords:** aluminum cell; fault diagnosis; BP neural network; expert system; layering

## 0 引言

铝电解工业在我国国民经济中占有十分重要的地位。作为铝电解生产中的典型设备, 电解槽的运行状况对经济效益、日常生产和电解槽使用寿命等有直接影响。电解槽一旦发生故障, 轻则导致电解槽电流效率下降、能源消耗大幅增高<sup>[1-2]</sup>, 重则引发停槽事故、影响整个电解槽体系的生产, 因此对电解槽情况的诊断尤为重要。

铝电解过程机理复杂, 同时受高温、强磁场和强电场相互干扰的影响, 槽况复杂多变, 故障种类繁多、频发、不易诊断<sup>[3]</sup>。电解槽中能够在线连续测量的信号只有系列电流、槽电压和阳极位置, 而可以反映电解槽内部状况的参数只能通过人工定时检测, 测量误差大、不能准确反映电解槽故障特征, 同样影响诊断效率<sup>[4]</sup>。因此, 建立电解槽故障诊断系统, 详细分析电解槽故障特征, 提高诊断的准确率具有重要意义。

鉴于, 本文以兖矿科澳铝业公司 306 kA 电解槽为背景, 分析获取的电解槽参数, 针对不同故障特征, 建立分层故障诊断系统。前层采用 BP 网络对部分故障进行分类, 其结果作为模糊信息, 进行基于专家系统的后层预报, 对余下的故障做出

诊断, 将前层分类结果与后层预报结果相结合, 实现对单一和复合故障的诊断, 提高诊断的准确率<sup>[5]</sup>。

## 1 电解槽故障特征分析

铝电解生产过程中常见的故障包括针振、冷槽、热槽、阳极效应等, 其中针振现象又称槽噪声, 是一种槽电压波动现象, 包括低频针振 ( $f < 0.05$  Hz,  $T > 20$  s) 和高频针振 ( $f > 0.20$  Hz,  $T < 5$  s)。铝电解槽产生故障的原因繁多, 但是基本所有的故障都存在不同程度的针振, 同时针振的出现也可预示阳极效应、电解质含碳等故障的发生, 导致难以根据针振现象直接判断电解槽故障<sup>[6]</sup>。

为准确反映电解槽故障特征, 本文选取槽电压  $V_n$  和系列电流  $I_n$  的计算值——表观槽电阻  $R_n$  作为故障诊断的依据, 对槽电阻作频谱分析, 提取出故障及正常情况下的特征信息<sup>[7-8]</sup>。

为避免人为因素对频谱分析的影响, 在没有换阳极、出铝、边部加工等现场工作下, 以 1 Hz 的频率采集科澳铝业公司 306 kA 电解槽控制系统的实时数据。分析数据前, 先对槽电阻进行去均值处理得到  $\bar{R}_n$ , 降低零频峰值对信号频域分析的影响。将  $\bar{R}_n$  取傅里叶变换得到  $X(e^{j\omega})$ , 采用功率谱估计法对不同槽况下的槽电阻进行频谱分析:

$$P(e^{j\omega}) = \frac{1}{N} |X(e^{j\omega})|^2 \quad (1)$$

获取的槽电阻特征信息见表 1。

收稿日期: 2014-04-09; 修回日期: 2014-05-08。

作者简介: 丁立伟(1975-), 男, 山东日照人, 高级工程师, 硕士, 主要从事有色冶金、故障诊断及智能控制等方向的研究。

表 1 不同槽况下槽电阻的频谱特征

序号	槽况	槽电阻的频谱幅值
1	正常状态	无明显规律
2	铝液波动	$f=0.02-0.03$ Hz 处有一个明显峰值
3	阳极长苞	$f=0.03-0.04$ Hz 和 $f=0.06-0.07$ Hz 处分别有一个明显峰值
4	极距过低、电解质含碳	$f=0.35$ Hz 处有一个明显峰值
5	阳极效应	有不同程度的频谱峰值
6	冷槽	$f<0.05$ Hz 时出现明显峰值
7	热槽	$f>0.20$ Hz 时出现明显峰值

由表 1, 其中  $f$  表示频率, 可以看出 2、3 和 6 号槽况仅出现低频针振现象, 4 和 7 号槽况仅出现高频针振, 5 号槽况则有同时出现低频和高频针振, 以及只出现一种针振现象的可能。2、3 和 4 号槽况的针振次数和频率取值较明确, 容易根据此特征对故障做出诊断, 而 5、6 和 7 号槽况的特征较为模糊, 通过频域分析无法诊断这三种故障。

六种故障的槽电阻存在精确和模糊两类频谱特征, 难以通过一种诊断方法得出故障类型, 可以选取两种诊断方法分别对两类故障进行诊断。

## 2 铝电解槽分层故障诊断系统设计

生活中, 人们对事物的判断一般是分层进行的, 首先获取模糊或外部轮廓信息, 并对事物做出初步判断, 若与期望结果相差较大, 则不进行下一步判断, 否则继续获取该事物的精确特征信息, 并做出准确判断。

根据上述信息分层获取的思想, 结合电解槽故障的频谱特征, 本文提出一种电解槽故障的分层诊断法。首先根据槽况的针振次数和频率取值, 准确判断是否属于正常、铝液波动、阳极长苞或极距过低的槽况, 并将判断结果划分为正常、出现低频针振和出现高频针振三种类型, 确定故障的模糊信息; 然后根据槽况类型继续对阳极效应、冷槽和热槽故障进行分析, 若槽况属于出现低频针振, 则只分析阳极效应和冷槽故障, 若为高频针振, 则只分析阳极效应和热槽故障, 通过比较故障的置信度与设置的阈值, 准确确定故障诊断结果。

分层故障诊断系统包括前层分类和后层预报, 前层分类可得到故障类型这一模糊信息, 后层预报则将故障具体化。诊断流程图如图 1。

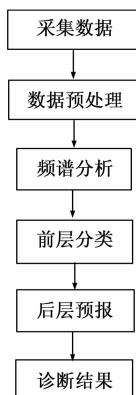


图 1 分层故障诊断流程图

### 2.1 基于 BP 网络的前层分类器设计

BP 网络是基于误差反向传播算法的多层前馈神经网络, 由于其结构简单、学习算法步骤明确, 使其广泛应用于函数逼近、模式识别、分类、数据压缩等领域。电解槽故障诊断的核心技术是模式识别, 应用 BP 网络则可发挥其独特优势<sup>[9]</sup>。因此, 本节选取 BP 网络建立故障诊断模型, 包括以频谱能量为特征向量的故障样本和网络模型<sup>[10]</sup>。

#### 2.1.1 选取输入输出变量

根据表 1 中槽电阻频谱特征, 对输入数据选取 12 个特征向量, 分别是 0~0.01 Hz、0.01~0.02 Hz、0.02~0.03 Hz、0.03~0.04 Hz、0.04~0.05 Hz、0.05~0.06 Hz、0.06~0.07 Hz、0.07~0.08 Hz、0.08~0.09 Hz、0.09~0.2 Hz、0.2~0.5 Hz 等 11 个频段能量占总能量的百分比以及总频谱能量。

前层分类存在四种输出类别: 正常状态、铝液波动、阳极长苞、极距过低或电解质含碳, 分别采用类别码 1、2、3、4 表示。

通过以上分析, 确定 BP 网络的输入层节点数为 12, 输出层取 4 个节点。隐含层节点个数由 Hebb 提出的公式确定:

$$t = (n + m)^{0.5} + \delta \quad (2)$$

式中,  $t$  是隐含层节点数,  $n$  是输入层节点数,  $m$  是输出层节点数,  $\delta$  是 1~10 之间的常数。选择  $\delta$  为 5, 得出隐含层节点为 9 个。

采用反余切函数对总频谱能量作归一化处理, 并将故障样本划分为训练样本和测试样本。

### 2.2 基于专家系统的后层预报器设计

本节采用专家系统对阳极效应、冷槽和热槽故障进行分析, 从现场人员处获取经验和数据来完善系统的知识库, 弱化了推理机的人机交互功能, 仅根据数据和规则进行推理, 实现诊断功能。其中, 数据包括历史数据和实时数据, 规则包括故障诊断规则和控制规则<sup>[11]</sup>。

#### 2.2.1 获取预报信息

研究表明, 发生阳极效应的主要原因是氧化铝浓度过低, 此外槽电阻变化率、物料累计偏差和电阻针振强度等因素也可能导致阳极效应的发生<sup>[12]</sup>。热槽和冷槽故障的产生均与电阻针振和效应电压有关, 只是故障的表现形式不同。因此, 可根据上述参数的变化特征, 来判断故障类别。

通过对槽电阻信号进行滤波处理, 得到滤波槽电阻  $R_w(n)$  后, 即可计算出 2 m 内低通滤波槽电阻的平均变化率—槽电阻斜率  $S(n)$ 、8 m 内低通滤波槽电阻的累计增量—槽电阻累计斜率  $T(n)$ 、30 s 内电阻针振值  $H(n)$  和 2 h 内的物料累计偏差  $W(n)$  等参数值, 作为专家预报的判据:

$$S(n) = \{R_w(n-1) - R_w(n-3) + 2[R_w(n) - R(n-4)]\} / 5 \quad (3)$$

$$T(n) = (15/16)T(n-1) + S(n)/2 \quad (4)$$

$$H(n) = R_{\max} - R_{\min} - |R_w(n) - R_w(n-1)| \quad (5)$$

$$W(n) = (119/200)W(n-1) + F(n) - cI(n) \quad (6)$$

其中:  $n$  是以 30 s 为周期的采样时刻。式 (5) 的  $R_{\max}$ 、 $R_{\min}$  是当前解析周期内原始电阻曲线的最大值和最小值。式 (6) 的  $F(n)$  为本周期内的下料量 (kg),  $I(n)$  为平均电流

(kA),  $c$  为氧化铝消耗量与电流的换算系数 (kg/kA)。

### 2.2.2 阳极效应预报

分析阳极效应产生原因, 可按下述思路进行阳极效应预报:

首先, 利用当前解析周期内的  $S(n)$  和  $T(n)$  推理确定当前预报阳极效应的可信度  $A$ 。为了便于计算, 将  $S$  和  $T$  映射到  $[0\sim 5]$  区间:

$$S' = \begin{cases} 0 & S < S_{\min} \\ \frac{S - S_{\min}}{S_{\max} - S_{\min}} & S_{\min} \leq S \leq S_{\max} \\ 5 & S > S_{\max} \end{cases} \quad (7)$$

$$T' = \begin{cases} 0 & T < T_{\min} \\ \frac{T - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} & T_{\min} \leq T \leq T_{\max} \\ 5 & T > T_{\max} \end{cases} \quad (8)$$

计算阳极效应可信度的取值, 并将其映射到  $[0\sim 1]$  区间:

$$A = (S' + T')/10 \quad (9)$$

其次, 根据近期  $H(n)$  的变化趋势以及  $W(n)$  的取值对  $A$  进行调整。将  $W(n)$ 、 $R_w(n)$  和  $H(n)$  均分为 5 个档级模糊语言变量, 分别用负大、负小、零、正小和正大表示, 并建立可信度调整的专家系统规则:

- 规则 1: if  $W(n)$  为正大 then 减小  $A$ ;
- 规则 2: if  $W(n)$  为负大 then 增大  $A$ ;
- 规则 3: if  $H(n)$  是正大并有增大趋势 then 增大  $A$ ;
- 规则 4: if  $H(n)$  是负小并有减小趋势 then 减小  $A$ ;
- 规则 5: if  $R_w(n)$  为负大 then 减小  $A$ ;
- 规则 6: if  $R_w(n)$  为正大 then 增大  $A$ ;
- 规则 7: if  $W(n)$  为负小、零或正小 then 不改变  $A$ ;
- 规则 8: if  $R_w(n)$  为负小、零或正小 then 不改变  $A$ 。

最后, 根据可信度  $A$  的取值对阳极效应预报做出处理。若当前周期内的  $A$  小于设定阈值 0.65, 则认为没有阳极效应趋势出现; 反之, 认为阳极效应即将出现, 并预报阳极效应故障。

### 2.2.3 冷槽预报

冷槽预报步骤与阳极效应预报一致。首先, 根据冷槽故障产生的原因, 由前次效应电压峰值  $V$  和电解槽三天内发生阳极效应频率  $F$  的映射值计算出冷槽故障的可信度  $A$ , 计算方法同阳极效应预报一致。其中,  $V$  一般取值范围为 30~80 V,  $F$  一般取值范围为 2~10。

其次, 根据以下规则调整冷槽预报的可信度:

- 规则 1: if 电阻针振  $H(n)$  为负小或者负大, then 不改变  $A$ ;
- 规则 2: if  $H(n)$  为零或正大, then 略微增大  $A$ ;
- 规则 3: if  $H(n)$  为正大, then 稍大程度增大  $A$ 。

最后, 根据当前周期内的可信度  $A$  是否大于设定阈值 0.6 来确定是否预报冷槽故障。

### 2.2.4 热槽预报

不同于冷槽预报, 热槽预报的可信度  $A$  由前次效应电压峰值  $V$  和电解槽距离前次效应的的时间  $t$  计算得出, 热槽时效应

电压较低,  $V$  取值范围为 10~25 V,  $t$  取值范围为 80~120 h。故障诊断规则和控制规则与冷槽预报一致。

### 2.3 电解槽故障诊断系统整体实现

通过对阳极效应、热槽和冷槽故障特征的分析, 可根据以下原则设计前层分类器和后层预报器的联接关系:

- 1) 如果前层分类的结果是正常状态, 则只分析热槽和冷槽故障, 但要对最后的可信度进行一定的惩罚。
- 2) 如果前层分类的结果是铝液波动状态, 则分析阳极效应和冷槽故障。
- 3) 如果前层分类的结果是极距过低或电解质含碳, 即出现高频针振现象, 此时分析阳极效应和热槽故障。
- 4) 如果前层分类的结果是阳极长苞状态, 则和铝液波动状态的处理一致。

结合以上原则, 对故障分析制定规则, 实现电解槽分层故障诊断的整体设计, 诊断流程如图 2 所示。

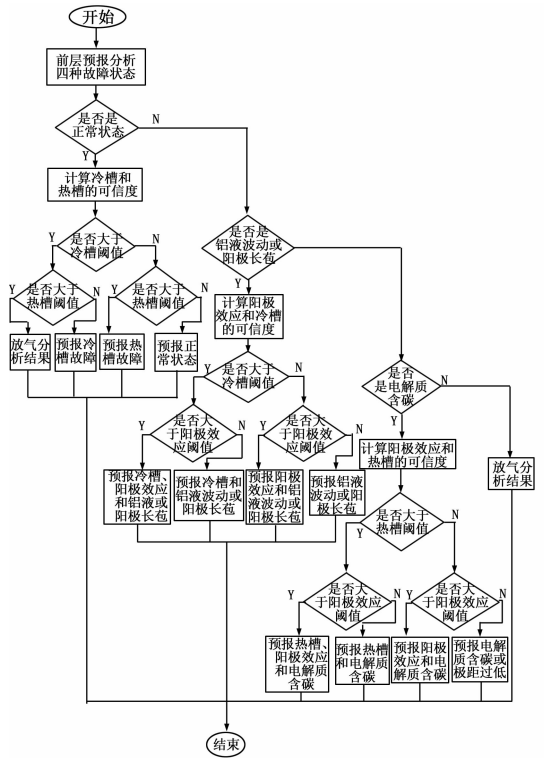


图 2 故障诊断流程图

在此系统中, 后层故障诊断相互独立, 诊断结果包括单一故障和复合故障。例如热槽和冷槽故障下都会出现阳极效应, 在确定故障时, 如果热槽和阳极效应故障可信度均大于设定阈值, 系统需同时预报这两种故障, 而不能根据可信度取值的大小确定故障。本系统的故障诊断结果涵盖各种可能出现的情况, 极大地提高了诊断准确率。

### 3 试验结果

本文对采用 BP 网络构建的前层分类器进行仿真实验, 选取输入层到隐含层的激励函数为 tansig 函数, 隐含层到输出层激励函数为 purelin 函数, 期望误差选择 0.005, 最大训练次数为 500 0 次, 初始学习速率为 0.05, 初始权值和阈值由 matlab

的神经网络初始化函数自动选取, 在 matlab 中搭建前层故障诊断模型。

部分 BP 网络测试样本诊断结果见表 2。

表 2 基于 BP 网络的部分诊断结果

序号	实际结果				诊断结果			
	1	2	3	4	1	2	3	4
1 (R)	1	0	0	0	0.908	0.026	0.003	0.063
2 (W)	1	0	0	0	0.442	0.075	0.402	0.092
3 (R)	0	1	0	0	0.010	0.950	0.006	0.038
4 (R)	0	0	1	0	0.011	0.030	0.904	0.060
5 (R)	0	0	0	1	0.064	0.038	0.094	0.807

注: 1—正常, 2—铝液波动, 3—阳极长苞, 4—电解质含碳, R—正确, W—错误

经过测试, 故障诊断的正确率为 92%, 表明 BP 网络用于电解槽前层故障分类是可行的。

#### 4 结束语

电解槽故障诊断对电解铝工业的发展具有十分重要的现实意义。针对电解槽故障种类繁多和不易诊断的问题, 本文提出了分层故障诊断方法, 建立基于 BP 网络的前层分类器和采用专家系统的后层预报器。仿真结果表明, 前层分类可准确对故障进行诊断。目前分层诊断系统仍处于理论研究阶段, 但可以预见, 本系统对故障特征的分析极为详细, 能够有效预报单一及复合故障, 提高故障诊断的准确率, 保证电解槽工作状况的稳定。

(上接第 3475 页)

比较图 6 与图 5 可以看出, 在同样的平均段数下, 有用信号的高阶分量 (48 阶) 的衰减得到了很大的抑制, 证明了该方法可有效的抑制时标误差引起的幅值衰减, 可用于直升机主减速器的故障特征提取。

#### 5 结论

如何采用有效的方法提高振动信号信噪比是直升机主减速器故障诊断中的关键问题之一, 本文在分析了时域同步平均原理及其作用的基础上, 开展了时域同步平均技术在直升机主齿轮箱故障特征提取上的应用研究, 并深入分析了在实际应用过程中时标误差的影响因素以及对时域同步平均分析结果的影响, 在此基础上提出了基于振动信号的时标相位补偿的时域同步平均方法。结果表明, 该方法可有效的提高直升机主减速器振动信号的信噪比, 同时将相关信号分离出来, 提高了故障特征提取的精度, 证明了该方法的可行性。

#### 参考文献:

[1] 冷军发, 荆双喜, 陈东海. 基于 EMD 与同态滤波解调的矿用齿轮箱故障诊断 [J]. 振动、测试与诊断, 2011, 31 (4): 435-438.  
 [2] Cheng J S, Yu D J, Yang Y. Application of an impulse response wavelet to fault diagnosis of rolling bearings [J]. Mechanical Sys-

#### 参考文献:

[1] 马淑珍. 300 kA 大型预焙电解槽节能降耗技术的研究与应用 [A]. 2011 (昆明) 中西部第四届有色金属工业发展论坛论文集 [C]. 昆明, 2011: 128-133.  
 [2] Li J J, Guan W, Zhou P. Optimal Control Strategy Research on Aluminum Electrolysis Fault Diagnosis System [J]. Information Technology Journal, 2013, 12 (14): 2824-2830.  
 [3] 李界家, 吴成东. 基于集成神经网络的多故障诊断方法 [J]. 控制工程, 2012, 19 (3): 407-411.  
 [4] 张 愉, 齐美星. 铝电解槽电阻信号的小波包分析 [J]. 苏州市职业大学学报, 2012, 23 (1): 19-23.  
 [5] 于阳阳, 文 方. 铝电解槽故障诊断方法综述 [J]. 现代机械, 2011, (4): 89-91.  
 [6] 周传良, 王喜春. 浅析铝电解槽的电压摆 [J]. 轻金属, 2012 (1): 41-44.  
 [7] 李贺松, 殷小宝, 黄涌波, 等. 基于阳极电流波动的铝电解槽槽况诊断系统 [J]. 化工学报, 2011, 62 (6): 1770-1777.  
 [8] Wang S P, Song Y J, Wang H. Aluminum Reduction Cell's Fault Monitoring Based on LS-SVM [A]. Advanced Materials Research Vols [C]. 2013: 2833-2837.  
 [9] 丁 蕾. 350kA 预焙铝电解故障诊断系统的研究 [D]. 北京: 北方工业大学, 2006.  
 [10] 曾水平, 姜晓聪, 曲亚鑫, 等. 铝电解过程的多维决策系统 [J]. 计算机测量与控制, 2013, 21 (10): 2783-2785.  
 [11] 邓胜祥, 马和平, 谢青松, 等. 预焙铝电解槽在线仿槽况诊断专家系统研究 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (8): 1850-1852.  
 [12] 姜绍龙. 铝电解槽健康诊断系统的研究 [D]. 北京: 清华大学, 2005.  
 [1] 李忠农, 刘卫兵, 易小兵. 基于局域均值分解的机械故障欠定盲源分离方法研究 [J]. 机械工程学报, 2011, (47): 97-102.  
 [2] 李 辉, 郑海起, 唐力伟. 形态分量分析在齿轮箱复合故障诊断中的应用 [J]. 振动、测试与诊断, 2013, 33 (4): 620-625.  
 [3] 沈长青, 朱忠奎, 黄伟国, 等. 基于支持向量回归方法的齿轮箱故障诊断研究 [J]. 振动、测试与诊断, 2013, 33 (5): 775-781.  
 [4] McFadden P D. Windows function for the calculation of the time domain averages of the vibration of the individual planet gears and sun gear in an epicyclic gearbox [J]. Journal of Vibration and Acoustics, 1994, 116 (1): 179-187.  
 [5] McFadden P D. Application of synchronous averaging to vibration monitoring of rolling element Bearings [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2000, 14 (6): 891-906.  
 [6] 沈国际. 振动信号处理技术在直升机齿轮箱故障诊断中的应用 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2005.  
 [7] 吕 琛, 宋希庚, 邹积斌. 基于 DSP 的振动信号阶比与时域同步分析 [J]. 振动与冲击, 2002, 21 (2): 53-57.  
 [8] 付海燕, 吉小军, 李兴旺. 基于 TSA 的直升机传动系统振动信号处理 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (3): 930-931.