

文章编号:1671-251X(2013)09-0031-06

DOI:10.7526/j.issn.1671-251X.2013.09.009

毕小玉,田慕琴,宋建成,等.主通风机电动机绝缘状态监测及故障诊断方法研究[J].工矿自动化,2013,39(9):31-36.

主通风机电动机绝缘状态监测及故障诊断方法研究

毕小玉, 田慕琴, 宋建成, 吝伶俐, 郑丽君, 李传扬

(太原理工大学 煤矿装备与安全控制山西省重点实验室, 山西 太原 030024)

摘要:分析了矿井主通风机电动机绝缘老化状态及绝缘故障产生原因和演变过程,介绍了一种矿井主通风机电动机绝缘状态在线监测及故障诊断系统;结合现有的故障数据库,针对绝缘状态故障诊断过程中信号的模糊性问题,提出了一种基于模糊理论与D-S证据理论的电动机绝缘故障诊断方法。该方法运用模糊理论求取故障信息的隶属度函数值,利用D-S证据理论组合规则进行信息融合与处理,根据相应的诊断判定准则,确定系统的绝缘故障类型。系统实例分析验证了该方法的可行性和有效性。

关键词:矿井主通风机;绝缘状态;故障诊断;D-S证据理论;模糊理论

中图分类号:TD635 文献标志码:A 网络出版时间:

网络出版地址:

Research of insulation condition monitoring and fault diagnosing method of motor of mine main ventilator

BI Xiao-yu, TIAN Mu-qin, SONG Jian-cheng, LIN Ling-yan, ZHENG Li-jun, LI Chuan-yang
(Shanxi Key Laboratory of Coal Mining Equipment and Safety Control,
Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The paper analyzed causes of insulation aging status and insulation failure and its evolution process of motor of mine main ventilator, introduced an online insulation condition monitoring and fault diagnosing system of motor of mine main ventilator. In order to solve problems which will lead to signal ambiguity in insulation status failure diagnosing process, it proposed insulation fault diagnosing method of motor based on fuzzy theory and D-S evidence theory combining with existing database of fault diagnostic information. The method uses fuzzy theory to calculate membership function values of fault information, and uses combination rules of the D-S evidence theory to realize information fusion and processing to determine types of insulation fault of the system according to corresponding diagnostic criteria. The instance analysis of the system verifies feasibility and validity of the method.

Key words: mine main ventilator; insulation condition; fault diagnosing; D-S evidence theory; fuzzy theory

0 引言

矿井主通风机是煤矿安全生产的重要设备之

一,担负着向矿井输送新鲜空气、排出有害气体,冲淡并排出井下的毒性、窒息性、爆炸性气体和粉尘,保障矿井安全生产的重任。矿井主通风机电动机在

收稿日期:2013-03-07。

基金项目:高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20111402110010);山西省青年自然科学基金资助项目(2011021015-1);国家国际科技合作专项项目(052013ZR0493)。

作者简介:毕小玉(1986—),女,河北秦皇岛人,硕士研究生,研究方向为高电压与绝缘技术, E-mail:bixiaoyu0313@163.com。

长期运行过程中遭受电应力、机械应力和热应力的联合作用,加之运行环境恶劣,使其介电、机械性能逐渐变坏,电气强度降低,绝缘系统发生老化,最终导致绝缘故障。

传统的故障诊断方法如兆欧表测量绝缘电阻法,在信号获取方面大多基于单传感器,只能采集到系统设备的部分信息,反映设备运行状态的某一侧面,并不能完善、可靠地反映电动机运行的真实状态,诊断结果往往带有单一性和片面性。通过比较常见诊断方法的优缺点、结合矿井主通风机电动机的现场实际调查,笔者提出了一种利用 D-S 证据理论与模糊理论相融合的故障诊断方法,可对矿井主通风机电动机的主绝缘相关参数如绝缘电阻、温度、局部放电信号进行在线监测,最大限度地获取绝缘状态信息,并可实时将多源信号和故障现象进行融合诊断,判断定子绝缘的老化程度,识别故障模式。

1 电动机绝缘老化状态分析

矿井主通风机用三相交流异步电动机绝缘系统老化主要体现在定子绝缘老化中,通过总结电动机常见的绝缘故障类型,分析故障发生的原因以及故障发生过程中较明显的特征量,进而模拟绝缘故障的演变过程,最后确定状态监测量,建立健全的故障数据库,达到分析绝缘老化状态的目的。

1.1 绝缘故障及其产生的主要原因

由于主通风机电动机运行环境恶劣,所以,其绝缘系统在耐热性、耐持久性、机械强度和对运行环境的抵抗力方面都是比较薄弱的,容易发生故障^[1]。电动机绕组绝缘性能受绝缘材料性能、制造工艺、运行安装环境及电、热、化学等综合因素影响,发生故障的原因比较复杂。具体故障以及诱发原因统计见表 1。从表 1 可看出,通风机电动机绝缘系统在电动机运行的过程中受电因子、热因子、机械力因子以及环境因子 4 种应力作用,发生了种种化学物理变化,归纳发生绝缘故障的主要因素有老化、磨损、过热、受潮、污染、电晕等。

1.2 故障演变的过程分析

主通风机电动机发生故障时,首先表现为一个或多个物理量的变化。因此,需要明确这些物理量的变化引起故障演变的过程,以便于正确地找出故障产生的原因。图 1 为矿井主通风机电动机绝缘老化故障演变过程^[2]。

从图 1 可知,综合考虑绝缘老化故障影响因子,主通风机电动机绝缘状态监测及故障诊断系统最终

表 1 绝缘故障及诱发原因

故障现象	故障原因
绕组绝缘磨损	长期高温作用,绝缘层内溶剂挥发使槽楔松动;绕组内部器件发生相对位移;绝缘沾满油垢、粉尘。
介质损耗角增大	线圈遭受损伤,使绝缘内部产生较多气隙;绝缘受潮;绝缘处理不当;绝缘老化等。
绕组接地故障	电动机长期过载,绝缘老化变质引起绝缘对地击穿;导电粉尘使爬电距离减小;线圈绝缘老化收缩经常颤动,使绝缘损伤对地击穿;由于线圈短路烧焦绝缘,造成对地故障。
绕组短路故障	线路过电压;绕组绝缘老化;遭受机械力和电磁力后的绝缘产生裂纹或遭受损伤。
绝缘击穿	层间垫条磨损;匝间绝缘遭受损失;匝间绝缘厚度不够或结构不合理。

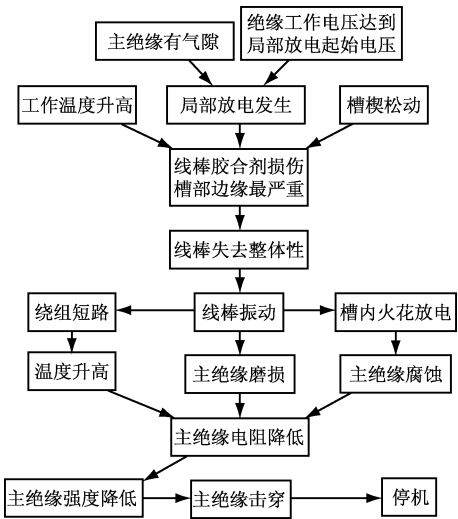


图 1 矿井主通风机电动机绝缘老化故障演变过程
选择监测绝缘电阻、温度和三相绕组局部放电 3 种状态参量。

2 状态监测及故障诊断系统

2.1 系统结构

根据矿井主通风机电动机绝缘状态信号的快速时变特点及信号数量的要求,绝缘状态实时监测系统采用以 C8051F020 单片机为中央处理单元的信号检测与处理硬件电路,配合高速信号传感器,对电动机的绝缘电阻、温度、局部放电信号进行采集。硬件采集电路主要由信号采集电路、数字信号输入电路、数据处理电路、CPU 控制电路等组成^[3]。系统硬件结构如图 2 所示。

2.2 系统功能

该监测系统可实现对矿井主通风机高压电动机绝缘状态的在线监测功能以及预警功能。

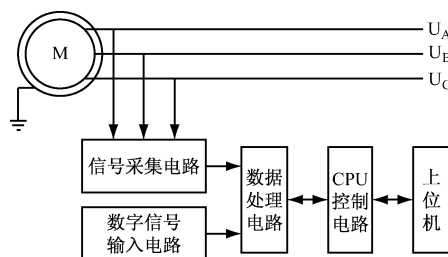


图 2 绝缘状态实时监测系统硬件结构

2.2.1 状态监测功能

在矿井主通风机高压电动机上安装定子绝缘局部放电信号拾取单元、温度传感器分别获得局部放电、温度参量,使用附加直流电源叠加法获取绝缘电阻参量,将这 3 种状态参量进行信号调理和 AD 转换后上传至上位机,提取并显示绝缘电阻、温度的实时值和局部放电的三维谱图,实现系统的绝缘状态在线监测功能。

2.2.2 预警功能

上位机通过对监测数据的分析、融合、诊断,给出绝缘状态故障预警结论,同时把故障预警结论写入上层服务器数据库^[4]。监控室的客户端读取上层服务器数据库并进行显示,使工作人员能够直观地看到高压电动机的在线监测数据与故障预警结论,及时了解矿井主通风机高压电动机的运行状态。

3 电动机故障诊断方法的确定

针对绝缘状态监测及故障诊断系统的实际情况,从矿井主通风机电动机在线监测与故障诊断的实际应用考虑,矿井主通风机电动机的故障诊断在国内的发展尚处于起步或较早状态,对故障维护检修仍处于随坏随修或定期维修的阶段,因此,构建大规模比较完备的专家库尚不成熟,另外矿井主通风机电动机状态监测系统需要较强的容错能力和实时性,即要对通风机电动机的运行情况进行在线诊断并发出警报,尽量避免故障情况的误报^[4]。

模糊理论能将领域知识和经验融入故障诊断,解决诊断过程中的模糊性问题,证据理论可以解决由于模糊理论造成的相关不确定性问题,因此,系统采用模糊理论与 D-S 证据理论相结合的故障诊断方法对矿井通风机电动机绝缘故障进行诊断分析。在融合中用故障的隶属度函数值代替 D-S 证据理论中的相关系数^[5-6]。故障诊断方法原理如图 3 所示。

3.1 D-S 证据理论在故障诊断中的应用

矿井主通风机电动机是一个证据系统,绝缘故

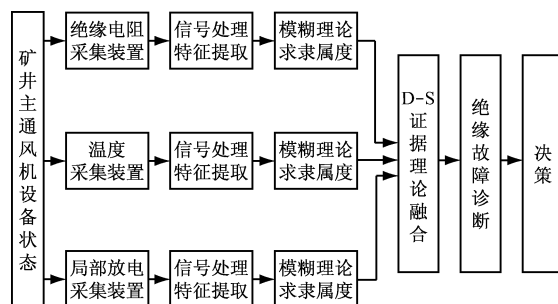


图 3 故障诊断方法原理

障的形成与发展是一个渐变过程,在电动机运行的过程中系统不断地监测到绝缘电阻、温度、局部放电信号实时变化的情况,将这些信息加工成证据理论需要的故障特征作为证据,求取各证据的信度函数,表示其发生某种故障的概率大小,利用 D-S 证据理论合成规则,对所获取的证据组进行融合推理,计算融合后结果为何种故障的信度区间,最后根据特定的判定准则确定故障类型,得出故障诊断结果^[7-9]。

3.1.1 信度函数

证据理论的论域成为识别框架记为 Θ ,其中包括有限个基本命题,记为 $\{A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_n\}$,对应于概率论中的基本事件,称为基元,在故障诊断中对应基本的故障模式, Θ 中事件是互斥的^[6,10]。本系统中各传感器测得的信号属于各类故障的信度函数 $m_j(A_1), \dots, m_j(A_i), \dots, m_j(A_n)$, $m_j(A_i)$ 表示监测参量 j 测得的症状属于故障 A_i 的信度函数。

3.1.2 信度函数的获取

信度函数分配是表示人对故障模式假设的可信程度的一种推理,是一种人为的判断,这种判断受各种因素的影响,不同的思路会构成不同的信度函数分配公式。

$$\alpha_j = \max\{C_j(A_i)\}, \quad i = 1, 2, \dots, N_c \quad (1)$$

$$\beta_j = \frac{\left[N_c W_j / \sum_{i=1}^{N_c} C_j(A_i) - 1\right]}{(N_c - 1)}, \quad N_c \geq 2 \quad (2)$$

$$R_j = \frac{W_j \alpha_j \beta_j}{\sum_{j=1}^N W_j \alpha_j \beta_j}, \quad j = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

式中: α_j 为传感器 j 的最大相关系数; $C_j(A_i)$ 为传感器 j 对目标模式 A_i 的相关系数; N_c 为目标模式数目; N 为传感器的总数; W_j 为传感器 j 的环境加权系数,其值域为 $[0, 1]$; β_j 为传感器 j 的相关分配值; R_j 为传感器 j 的可靠性系数。

传感器 j 对目标模式 A_i 的信度函数 $m_j(A_i)$ 为

$$m_j(A_i)=\frac{C_j(A_i)}{\sum_{i=1}^{N_C}C_j(A_i)+NK(1-R_j)(1-W_j\alpha_j\beta_j)}\quad(4)$$

式中： K 为修正系数。

传感器 j 的不确定性 θ 的信度函数为

$$m_j(\theta)=1-\sum_{i=1}^{N_C}m_j(A_i)\quad(5)$$

利用模糊理论中的隶属函数 U_{ij} 来代替 $C_j(A_i)$ ，因为这 2 个量在物理意义上都表示根据某一传感器测量值来评估被测对象隶属于某一目标类型的程度，即两者之间的相关性^[14]。

3.1.3 组合规则

设 m_1, m_2 分别对应同一识别框架 Θ 上的信度函数分配，焦元分别为 $A_1, A_2, \cdots, A_k$ 和 $B_1, B_2, \cdots, B_k$ ，设

$$\sum_{\varphi=A_i\cap B_j}[m_1(A_i)m(B_j)]<1\quad(6)$$

合成后的基本可信度分配函数 $m:2^\theta\rightarrow[0,1]$ 为

$$m(A)=\frac{\sum_{A=A_i\cap B_j}m_1(A_i)m_2(B_j)}{1-C},\quad A\neq\varphi\quad(7)$$

$$m(A)=0,\quad A=\varphi\quad(8)$$

$$C=\sum_{\varphi=A_i\cap B_j}m_1(A_i)m_2(B_j)\quad(9)$$

3.1.4 判定规则

矿井主通风机电动机绝缘故障诊断系统中故障决策遵守以下规则^[11]：

(1) 判定的故障类型应具有最大的信度函数值，并要大于某一阈值，此处取 0.500 0。

(2) 判定的故障类型和其他类型的信度函数值之差要大于某个门限，此处取 0.150 0。

(3) 不确定故障函数值必须小于某个门限，此处取 0.050 0。

(4) 判定故障类型的信度函数值要大于不确定信度函数值。

3.2 模糊理论下隶属度函数的处理

证据理论中传感器对目标模式的相关系数是利用模糊理论中的隶属度函数来代替的，所以需要利用模糊数学的方法对指标进行模糊化，其中包括对定性指标的模糊处理，使其定量化、便于精确地进行量化评估^[12]。

具体分析处理如下：

(1) 对于绝缘电阻信号和温度信号，基本符合线性关系，采用三角形隶属度函数进行模糊化：

$$u(x)=\begin{cases}0,&x\leqslant a\\ \frac{x-a}{b-a},&a\leqslant x\leqslant b\\ \frac{c-x}{c-b},&b\leqslant x\leqslant c\\ 0,&c\leqslant x\end{cases}\quad(10)$$

式中： a, b, c 分别表示上、中、下 3 个阈值， a, b, c 的数值大小与电动机型号有关。

(2) 对于局部放电信号，很难用精确的数学公式描述，所以运用工作经验打分为主，定义其值在 0~10 之间，采用式(11)确定模糊隶属度。

$$u(x)=x/10\quad(11)$$

4 算例分析

将矿井主通风机电动机可能发生的 3 种绝缘故障暂时定义为 A_1 为绝缘故障严重等级轻、 A_2 为绝缘故障严重等级中、 A_3 为绝缘故障严重等级重。识别框架为 $\{A_1$ 绝缘故障严重等级轻、 A_2 绝缘故障严重等级中、 A_3 绝缘故障严重等级重 $\}$ 。由于绝缘发生故障多数是由绝缘老化造成，当故障状况处在 2 种等级之间时难以判断是何种故障，因此，用不确定度代替。根据工作经验、系统自身环境因子及传感器相关参数设置等情况，可信度分配见表 2。

表 2 监测信号的可信度

信号	A_1	A_2	A_3	不确定度
绝缘电阻	0.467 1	0.251 3	0.101 9	0.179 7
温度	0.308 4	0.302 2	0.114 3	0.275 1
局部放电	0.321 7	0.333 1	0.141 9	0.203 3

结合表 2 中的数据，运用式(12)一式(13)计算出根据 3 种监测信号融合判断 3 种故障的可信度。

$$\begin{aligned}C'&=m_1(A_1)[m_2(A_2)+m_2(A_3)]+\\&m_1(A_2)[m_2(A_1)+m_2(A_3)]+\\&m_1(A_3)[m_2(A_1)+m_2(A_2)]=0.363\ 0\end{aligned}\quad(12)$$

$$\begin{aligned}m(A_1)'&=\\&\frac{m_1(A_1)m_2(A_1)+m_1(A_1)m_2(\theta)+m_1(\theta)m_2(A_1)}{(1-C')}=\\&0.514\ 9\end{aligned}\quad(13)$$

与求取 $m(A_1)'$ 方法同理，根据式(13)可计算出 $m(A_2)'=0.313\ 0, m(A_3)'=0.094\ 5, m(\theta)'=\frac{m_1(\theta)m_2(\theta)}{(1-C')}=0.077\ 6$ ，计算结果见表 3。

绝缘电阻和温度信号融合后的结果与融合前信

表 3 2 种监测信号融合后的信度函数

信号	A ₁	A ₂	A ₃	不确定度
绝缘电阻与温度融合	0.514 9	0.313 0	0.094 5	0.077 6
局部放电	0.321 7	0.333 1	0.141 9	0.203 3

号单独诊断相比,故障 A₁ 和 A₂ 的可信度提高了,故障 A₃ 的可信度相对降低了,不确定度降低了。由于故障 A₁ 和 A₂ 的信度函数值都提高了,并不能完全确定是哪种故障等级,可能会出现错误的判断,所以,需将 3 种监测信号进行融合,即将绝缘电阻和温度信号融合后的信度函数与局部放电信号的信度函数进行合成。

$$C = m(A_1)'[m_3(A_2) + m_3(A_3)] + m(A_2)'[m_3(A_1) + m_3(A_3)] + m(A_3)'[m_3(A_1) + m_3(A_2)] = 0.451\ 6$$

$$m(A_1) = \frac{m(A_1)'m_3(A_1) + m(A_1)'m_3(\theta) + m(\theta)'m_3(A_1)}{(1-C)} = 0.538\ 4$$

(14)

与求取 m(A₁) 方法同理,根据式(15)可计算出 m(A₂) = 0.353 3, m(A₃) = 0.079 6, m(θ) = $\frac{m(\theta)'m_3(\theta)}{(1-C)}$ = 0.028 8。最终的计算结果见表 4。

表 4 3 种监测信号融合后的信度函数

信号	A ₁	A ₂	A ₃	不确定度
绝缘电阻	0.467 1	0.251 3	0.101 9	0.179 7
温度	0.308 4	0.302 2	0.114 3	0.275 1
局部放电	0.321 7	0.333 1	0.141 9	0.203 3
3 种信号融合结果	0.538 4	0.353 3	0.079 6	0.028 8

根据上述融合过程和系统的故障判定法则,可知系统的绝缘故障为 A₁ 绝缘故障严重等级轻。融合次数越多即系统中监测信号量越全面,故障诊断结果也越精确,可靠性也越高。

5 结语

为保证矿井主通风机电动机运行的可靠性和安全性,区别于传统的离线监测手法,矿井主通风机电动机绝缘状态在线监测系统采用非侵入式监测手段对矿井主通风机电动机的绝缘电阻、温度、局部放电进行在线监测,使监测人员及时了解通风机电动机运行状态。系统采用模糊理论与 D-S 证据理论相

结合的方法对矿井通风机电动机绝缘故障进行诊断分析,算例分析结果表明,该故障诊断方法可行、有效,系统监测参量越全面,融合次数越多,故障诊断结果越精确,系统诊断的可靠性越高。

该矿井主通风机电动机绝缘故障诊断系统在实际使用过程中同样适用于与矿井主通风机电动机内部结构及参数相似的其他高压电动机,如带式输送机等。

在以后的研究工作中,故障诊断系统要扩大矿井主通风机电动机的监测范围,增加电动机的机械与电气参数的监测量,使系统的故障诊断更全面;扩大系统监测范围后,同类型传感器数量增多,应首先对同类传感器本身的一次数据进行融合处理后,再对异类传感器进行二次数据融合,从而评判出该矿井所处的安全等级。

系统的故障数据库建立健全后,应将证据理论方法融合后的结果应用于专家系统中,构建大规模比较完备的专家知识库,使系统的故障诊断更可靠,更具有说服力。

参考文献:

[1] 刘杰.高压电动机绝缘在线监测系统研究[D].太原:太原理工大学,2010.

[2] SUN Q D,ZHOU Z X,GUO W Q. An approach of insulation state on-line monitoring and fault diagnosis for generator and its application[C]// Power and Energy Engineering Conference, 2010.

[3] 刘杰,郑丽君,高云广,等.基于 C8051F020 的矿井 127 V 综合保护系统的设计[J].工矿自动化,2010,36(2):32-35.

[4] 彭华东,陈晓清,任明.风电机组故障智能诊断技术及系统研究[J].电网与清洁能源,2011,27(2):61-66.

[5] 王古常,成坚,鲍传美,等.模糊推理和证据理论融合的航空发动机故障诊断[J].航空动力学报,2011,26(9):2101-2106.

[6] 朱大奇.航空电子设备故障诊断新技术研究 [D].南京:南京航空航天大学,2002:65-71.

[7] 韩艳娟.基于信息融合技术的矿井主通风机故障诊断系统的开发[D].太原:太原理工大学,2009:15-23.

[8] 李丽,程久龙.基于信息融合的矿井底板突水预测[J].煤炭学报,2006,31(5):623-626.

[9] 汤扣林,陆中华.基于证据理论及冲突属性转换的目标识别方法[J].指挥信息系统与技术,2011,2(6):

46-50.

[10] 段新生. 证据理论与决策、人工智能[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1993: 13-46.

[11] 朱大奇, 徐振斌, 于盛林. 基于证据理论的电动机故障诊断方法研究[J]. 华中科技大学报, 2001, 29(12):

58-60.

[12] 张雷, 常天庆, 朱斌, 等. 基于模糊推理的炮控系统性能评估与故障诊断[J]. 计算机测量与控制, 2010, 18(8): 1815-1817.