

文章编号:1000-582X(2001)06-0067-04

挖掘机提升控制系统故障诊断的改进模糊算法

韩力, 易将能, 周晓峰

(重庆大学 电气工程学院, 重庆 400044)

摘要:研究矿山挖掘机提升控制系统的故障诊断方法对减少其故障和由此带来的巨大经济损失具有重要意义。笔者首次提出了针对复杂控制系统的基于功能的故障描述和故障整理方法,并将控制领域中的改进模糊算法引入到故障诊断领域,建立了WK-4挖掘机提升控制系统电压负反馈回路的改进模糊诊断模型,并与传统模糊诊断模型进行了比较,验证了改进模糊诊断模型的有效性和先进性。该方法可广泛应用于矿山挖掘机各种控制系统的故障诊断中。

关键词:故障诊断;模糊数学;直流控制系统;挖掘机

中图分类号:TP 206+.3;TM 762

文献标识码:A

WK-4挖掘机是我国露天矿采掘的主要设备之一,它主要由提升机构、推压机构、回转(走行)机构3部分组成。其主要结构如下:由1台250 kW、6 000 V的三相交流电动机带动同轴的3台直流发电机,这3台直流发电机分别为分管铲头提升、铲架推压、挖掘机回转、挖掘机走行的4台直流电动机供电,完成挖掘机的基本铲装动作,其中回转和走行电动机共用1台直流发电机。其直流发电机采用两组独立的他励绕组,一组供正向励磁,使发电机产生正向电压,电动机正向旋转;另一组供反向励磁,使发电机产生反向电压,电动机反向旋转。电动机的转向由挖掘机驾驶员操作主令开关控制。

WK-4挖掘机控制系统由于内部空间狭小、设备多、温度高、粉尘大、振动大、正反转频繁,且经常过载,因此故障率高、维护不方便、故障损失大。长期以来,由于露天矿开采的环境十分恶劣,这类挖掘机故障频繁,给企业造成了巨大的经济损失。据攀钢矿业公司统计,在生产高峰时1台挖掘机因控制系统故障造成的修理费平均每年高达70万元。但该系统故障知识的积累却很缓慢,目前尚未发现针对WK-4型挖掘机控制系统的故障检测与诊断模型。究其原因,故障描述含糊、混乱是一个重要方面。为此,笔者首次提出了针对这类复杂控制系统的基于功能的故障描述和故障整理方法。

1 复杂控制系统故障描述思想的研究

目前许多文献在描述故障时^[1-5],常用故障现象

或故障原因来指代故障本身,工厂也用这种方法来描述故障。但是笔者认为故障现象没有很好地揭示一个故障的本质,而故障原因一时又难以准确确定。为此,笔者从便于描述和诊断的角度尝试提出一种基于功能的故障描述方法。

故障的描述和诊断可以明确到若干不同层次。总体来说,元件在系统中的作用是实现其功能,故障可以归结为一个元件或一个回路的功能障碍。如果将故障诊断到元件层次,则故障可表述为一个元件的功能障碍;如果将故障诊断到回路层次,则故障可表述为一个回路的功能障碍。因此可以用功能状况来表征元件或回路的故障状况。将一个复杂控制系统分成若干层次的若干个简单功能模块,以抽象的元件功能来代替具体的元件属性,以抽象的回路间功能关系来代替回路间的实际物理关系,通过诊断元件或回路的功能状态来间接诊断系统元件或回路的故障。这种故障分析的思想,对复杂控制系统的故障知识积累、故障诊断系统的开发能够起到良好的规范和引导作用。

为此,文中将WK-4挖掘机提升控制系统以基于功能的故障描述思想分成了7个功能回路,即:电枢主回路、电压负反馈回路、电流截止负反馈回路、位移回路、电动机励磁回路、发电机励磁回路、磁放大回路。并首次系统地将WK-4挖掘机提升控制系统的主要故障与这7个回路的功能状态对应起来,而这7个回路的功能状态可以通过下述故障诊断模型的检测量检测出来。

· 收稿日期:2001-06-18

作者简介:韩力(1963-),男,重庆人,重庆大学副教授,从事电机与电器设备的现代设计方法研究。

2 故障诊断模型的检测输入量

2.1 输入量的确定

根据对 WK-4 挖掘机提升控制系统故障机理的分析与总结,文中采取如下输入量:1) 主令给定电流;2) 电枢电压;3) 电枢回路电流;4) 位移回路电流;5) 电压负反馈回路电流;6) 电流截止负反馈回路电流;7) 直流发电机励磁电流;8) 直流电动机励磁电流。但对于某一个功能回路的诊断,并不需要把上述全部输入量都用上。对于典型的双输入单输出模糊诊断器,只需要其中的两个输入量。

2.2 输入量之间的稳态关系

为便于问题分析,假定挖掘机处于稳态时,各量之间存在如下线性关系^[2,3]:1) 发电机的电枢电压正比于发电机的励磁电流;2) 电压负反馈回路电流正比于发电机电枢电压;3) 电流截止负反馈回路在导通时其电流正比于发电机-电动机主回路电流;4) 发电机电枢电压正比于:给定电流-位移回路电流-电压负反馈回路电流-电流截止负反馈回路电流。

3 基于模糊数学的故障诊断方法

因为模糊诊断模型对测量误差不敏感,能够出色地从总体上把握各变量之间的关系,所以适宜于 WK-4 挖掘机控制系统的故障诊断。对每一个功能回路的诊断,需选取诊断系统的两个输入量,再选取一个能够代表回路功能状态的特征值作为诊断系统的输出量,然后用模糊数学来推演故障诊断系统输入量和输出量之间的关系。

3.1 基于传统模糊算法的故障诊断系统建模步骤

1) 确定输入、输出模型;2) 将专家经验整理成规则;3) 将输入输出及上述规则用模糊数学表示出来;4) 根据上述规则推演出总模糊关系;5) 按输入乘以总模糊关系等于输出的原则,遍取可能的输入值,得到诊断规则表;6) 对每一组输入量,以查表的方式从诊断规则表查得输出论域值;7) 反模糊化,即得最后输出量。

传统模糊诊断方法具有推理过程不够透明、用户参与程度低、故障诊断系统改进困难、不利于新故障知识的应用等缺点。

3.2 基于传统模糊算法的电压负反馈回路故障诊断模型^[6]

1) 确定输入量。

① 输入量 1:发电机电枢电压,用 U_a 表示。

a. 基础论域 $[a, b]$,其默认值 $[a', b'] = [0 \sim 960 \text{ V}]$

b. 量化论域 $X_u = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$

c. 词集: $U_{a1}, U_{a2}, U_{a3}, U_{a4}, U_{a5}$, 对应于电枢电压“小”、“较小”、“中”、“较大”、“大”。

② 输入量 2:电压负反馈回路电流,用 I_f 表示。

a. 基础论域: $[c, d]$,其默认值 $[c', d'] = [0 \sim 20 \text{ mA}]$

b. 量化论域: $X_f = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$

c. 词集: $I_{f1}, I_{f2}, I_{f3}, I_{f4}, I_{f5}$, 对应于电压负反馈回路电流“小、较小、中、较大、大”。

2) 确定输出量:电压负反馈回路故障指示量,用 F 表示。

① 量化论域: $X_f = \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$

② 词集: F_1, F_2, F_3, F_4, F_5 , 对应于电枢电压的负反馈相对电流“太小”、“偏小”、“正常”、“偏大”、“太大”。

3) 编制 $U_a, I_f \rightarrow F$ 模糊专家经验表。

根据现场实际工作经验,归纳总结出故障判定的专家经验表(见表 1)。

表 1 模糊专家经验表

| | I_{f1} | I_{f2} | I_{f3} | I_{f4} | I_{f5} |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| U_{a1} | F_3 | F_2 | F_3 | F_5 | F_5 |
| U_{a2} | F_2 | F_3 | F_4 | F_5 | F_5 |
| U_{a3} | F_1 | F_2 | F_3 | F_4 | F_5 |
| U_{a4} | F_1 | F_1 | F_2 | F_3 | F_4 |
| U_{a5} | F_1 | F_1 | F_1 | F_2 | F_3 |

4) 编制 $X_u, X_f \rightarrow X_f$ 模糊判定表^[6](见表 3)。

5) 编制反模糊化表(见表 2)。

表 2 反模糊化表

| F | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 | 5 | 5 |
|-------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| X_f | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |

3.3 基于改进模糊算法的电压负反馈回路故障诊断模型

1) 确定输入量。

① 输入量 1:电枢电压,其模糊变量用 U_a 表示,实测值用 U 表示。

U 的量化论域 $X_u = [0, 8]$,实际输入量与量化论域间的转换公式为:

$$X_u = (8 - 0) \times U / (960 - 0) = U / 120 \quad (1)$$

② 输入量 2:电压负反馈回路电流,其模糊变量用 I_f 表示,实测电流值用 I 表示。

I 的量化论域 $X_f = [0, 8]$,实测输入量与量化论域间的转换公式为:

$$X_f = (8 - 0) \times I / (20 - 0) = 0.4 \times I \quad (2)$$

2) 确定输出量:电压负反馈回路故障指示量,用 F 表示。

F 的量化论域 $X_f = [0, 8]$

3) 编制 $U_a, I_f \rightarrow F$ 模糊判定专家经验表(同表 1)。

4) 运算推理过程^[7]。

① 对任意一个基础论域内的实测量 U ,从 U_a 隶属度函数图(文中选用三角形隶属度函数)上得到两个论域子集值及相应的隶属度,设为 $U_{a1}, U_{a2}, P(U_{a1}),$

$P(U_{a_i})$, 其中 U_{a_i}, U_{b_i} 为论域子集值, $P(U_{a_i}), P(U_{b_i})$ 为各论域子集值相应的隶属度。

② 同理, 对任意一个基础论域内的实测量 I , 从 I_f 隶属度函数图(本文选用三角形隶属度函数)上也得到两上论域子集值及相应的隶属度, 设为 $I_{f_1}, I_{f_2}, P(I_{f_1}), P(I_{f_2})$, 其中 I_{f_1}, I_{f_2} 为论域子集值, $P(I_{f_1}), P(I_{f_2})$ 为对应于论域子集值的隶属度

③ 组合。将实测数据 U 对应的两个模糊子集 U_{a_i}, U_{b_i} 与实测数据 I 对应的两个模糊子集 I_{f_1}, I_{f_2} 进行组合, 可得到下面四种情况:

$$M_1 = ZJ_1(U_{a_i}, I_{f_1}), P(M_1) = P(U_{a_i}) \wedge P(I_{f_1}) \quad (3)$$

$$M_2 = ZJ_2(U_{a_i}, I_{f_2}), P(M_2) = P(U_{a_i}) \wedge P(I_{f_2}) \quad (4)$$

$$M_3 = ZJ_3(U_{b_i}, I_{f_1}), P(M_3) = P(U_{b_i}) \wedge P(I_{f_1}) \quad (5)$$

$$M_4 = ZJ_4(U_{b_i}, I_{f_2}), P(M_4) = P(U_{b_i}) \wedge P(I_{f_2}) \quad (6)$$

其中: 组合 $M_1 \sim M_4$ 为从模糊诊断专家表查出的每一

组输入量的输出模糊子集值, $P(M_1) \sim P(M_4)$ 为组合 $M_1 \sim M_4$ 发生的概率。

$$\begin{aligned} \text{则: } X_F = & [M_1 \times P(M_1) + M_2 \times P(M_2) + \\ & M_3 \times P(M_3) + M_4 \times P(M_4)] / [P(M_1) + \\ & P(M_2) + P(M_3) + P(M_4)] \end{aligned} \quad (7)$$

与传统方法不同, 改进方法的故障程度量化论域 X_F 的取值是连续的, 它定量地反映了电压负反馈回路的功能状态。

5) 编制 $X_U, X_I \rightarrow X_F$ 模糊判定表。

对于改进模糊算法的故障诊断模型, 其诊断结果的数值是连续的。为了便于与基于传统模糊算法的故障诊断结果相比较, 文中将传统模糊算法故障诊断模型各量化论域的输入量(取中心点的值)作为改进模糊算法故障诊断模型的输入量, 计算出模糊判定表(见表3)。

表3 部分特定值的 $X_U, X_I \rightarrow X_F$ 模糊判定表

| X_U | X_I | | | | | | | | | |
|-------|-------|-------|---|-------|---|-------|---|-------|---|--|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | |
| 0 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | |
| 1 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 7.5/8 | 8 | 8 | 8 | |
| 2 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 8 | 8 | |
| 3 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 7.5/8 | 8 | |
| 4 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | |
| 5 | 0 | 0.5/0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0.5/0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | |

为便于比较, 这里将传统方法的诊断结果与改进方法的诊断结果并列于表3中。从表中可见, 仅有4个数据不同(见表中下划线单元格, 其中“/”下面为传统方法的计算结果)。显然, 改进方法的结果更准确地体现了输出随输入变化而连续变化的特性。

6) 输出值的反模糊化处理。

改进模糊诊断模型的反模糊化方法是按输出的隶属度函数图形来查表。当取与传统模型相同的输入值时, 改进模型有如表4所示的反模糊化表。

表4 输出值的反模糊化表

| X_F | | 0.0 | 1.0 | 2.0 | 3.0 | 4.0 | 5.0 | 6.0 | 7.0 | 8.0 |
|-------|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| F | F_1 | 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 4 | 5 | 5 |
| | $P(F_1)$ | 1.0 | 0.5 | 1.0 | 0.5 | 1.0 | 0.5 | 1.0 | 0.5 | 1.0 |
| | F_2 | 2 | 1 | 3 | 2 | 4 | 3 | 5 | 4 | 4 |
| | $P(F_2)$ | 0.0 | 0.5 | 0.0 | 0.5 | 0.0 | 0.5 | 0.0 | 0.5 | 0.0 |

其中: F_1, F_2 表示在基于改进模糊算法的故障诊断系统中, 每一个 X_F 值对应的两个故障词集; $P(F_1), P(F_2)$ 表示故障 F_1, F_2 发生的概率。例如表4中 $X_F = 1.0$ 就对应着“2”(即“电枢电流偏小”)和“1”(即“电枢电流太小”), 且“电枢电流偏小”的概率为0.5, “电枢电流太小”的概率也是0.5。电压负反馈回路绕组匝间短路是此种功能状态最可能对应的故障原因。

4 两种模糊诊断方法的分析比较

1) 输入量的处理方法: 传统方法将输入的实测数

据分级地划入几个量化论域, 划入同一量化论域的数值, 在以后的推理中就再无区别。这就存在如下问题: 一方面, 当输入量属于同一区域时, 输入量的大小变化被忽略; 另一方面, 可能两个实测数据相差很小, 却被划入不同的量化论域, 被看成两个不同性质的输入量, 引起较大的诊断误差。而改进方法在输入数据的处理上, 通过隶属度的连续变化体现了输入量的连续变化。因此, 改进方法既兼顾了分类的模糊性, 又定量地反映了数据的连续性。

2) 诊断结果的信息量: 用户无法从传统方法的诊

断结果中知道结果的可能概率(可信度);而改进方法告诉用户4个信息:发生了甲故障,属于甲故障的概率,发生了乙故障,属于乙故障的概率(若诊断系统确认一定是甲故障,则乙故障的概率为0)。显然,改进方法的诊断结果信息更丰富。

3) 用户对诊断的可参与性:传统方法不仅诊断结果信息单一,且推理过程对于用户来说也近乎于一个“黑箱”,因此用户可用于决策的信息很有限;而改进方法既给出了故障模式,也给出了该故障模式的概率,用户对故障诊断的可参与性较高。

4) 计算量的比较:由于传统方法需要计算总模糊关系,因而建模的计算量特别庞大,即使输入量的量化论域仅划分为8段,建模也需要数10万步,并且其计算量随输入量量化论域分段数的增加成指数规律增大;而改进方法的计算量与输入量量化论域的分段数基本无关,其建模计算量一般在1000步以内。

5) 诊断模型的可改进性:由于传统方法建模的运算量大,推理繁杂,因此模型的改进(无论是对规则的改进还是对参数的改进)对用户来说非常复杂,相当于重新设计一次模糊诊断器(软件);而在改进方法中,用户可以直接修改原诊断模型中的规则和参数,特别有利于故障知识的及时积累和应用,因此改进方法诊断模型的可改进性是传统方法所无法比拟的。

诊断速度:传统方法采用“查表”方式运作,速度快,对计算机硬件的要求低;而改进方法采取在线适时计算的方式运作,速度自然较传统方法逊一筹,对计算机硬件的要求也相对较高。因此,在要求诊断速度特别快,硬件特别简单的场合,传统方法也有其优势。

5 结论

笔者针对结构复杂、环境恶劣的WK-4挖掘机控制系统,首次提出了基于功能的故障描述和故障整理

思想。并首次将控制领域的改进模糊算法引入到故障诊断领域,分别建立了WK-4挖掘机电压负反馈回路的基于传统模糊算法的故障诊断模型和基于改进模糊算法的故障诊断模型。由于对电压负反馈回路的故障诊断模型中的参数和规则作相关修改后,即可适用于其它几个功能回路;将数个功能回路的故障诊断模型有机地联结起来,即成为WK-4挖掘机控制系统的完整故障诊断模型。为此,笔者仅以提升控制系统的电压负反馈回路为例,进行了故障诊断模型的设计及计算机编程计算,但其原理和方法对其它功能回路的故障诊断完全适用。此外,文中详细比较了两种算法及相应故障诊断模型的特点,与传统方法相比,基于改进模糊算法的故障诊断方法具有建模简单、模型改进容易、诊断准确、诊断信息丰富、适用性广泛等显著优点,可广泛应用于矿山挖掘机各种控制系统的故障诊断中。

参考文献:

- [1] 闻新. 控制系统的故障诊断和容错控制[M]. 北京:机械工业出版社,1998.
- [2] 罗世恒. 浅谈4m³挖掘机电气调整[J]. 矿山机械,1998,26(11):33-34.
- [3] 徐跃峰. 4M³挖掘机动力系统的故障诊断[J]. 矿山机械,1996,23(5):21-23.
- [4] 王颖. 用于电动汽车的模糊转矩控制系统仿真[J]. 重庆大学学报,1998,38(8):96-99.
- [5] 大穀隆一. 設備診断診断技術への期待[J]. 電氣評論,1999,84(10):5-7.
- [6] 何平,王鸿绪. 模糊控制器的设计及应用[M]. 北京:科学出版社,1997.
- [7] HASAN A R, SADRUL ULA A H M. Design and Implementation of a Fuzzy Controller Based Automate Voltage Regulator for a synchronous Generator [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1994, 9(3):550-555.

Improved Fuzzy Algorithm for Excavator's Elevating Controlling System

HAN Li, Yi Jiang-neng, ZHOU Xiao-feng

(College of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In order to reduce the faults and enormous economic losses of mining excavator's elevating controlling system, the research of the system's fault diagnostic methods is very valuable. Based on functional fault description and fault arrangement, a new method is offered for the complicated controlling system. The improved fuzzy algorithm of the controlling fields is introduced into the fault diagnostic fields. A improved fuzzy diagnostic model for the voltage's minus-feedback circuit of WK-4 excavator's elevating controlling system is built up and compared in detail with the traditional fuzzy diagnostic model. The results show the effectiveness and advantage of the improved fuzzy diagnostic model. The method proposed can be widely applied to fault diagnosis of mining excavator's various controlling systems.

Key words: fault diagnosis; fuzzy mathematics; direct current controlling system; excavator

(责任编辑 李胜春)