

锅炉系统故障诊断模糊推理方法

李德英* 张 跃

(清华大学 热能工程系, 土木工程系, 北京 100084)

摘要 根据锅炉系统实际运行情况, 分析其故障诊断的推理求解过程, 提出了专家系统中基于诊断知识的模糊描述方法, 并根据诊断规则实例, 采用模糊推理方法, 阐述故障诊断推理过程中正向推理、逆向推理模糊断言可信度的传递运算方法。

关键词 锅炉系统 故障诊断 模糊断言 可信度 模糊推理 专家系统

Fuzzy Inference method for Boiler Fault Diagnostic System

Li Deying Zhang Yue

(Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract According to the running status of boiler system, the inference and solution process of boiler fault diagnosis is analysed. A fuzzy description method of expert system based on diagnosis knowledge is proposed. The transmitting and calculating method of fuzzy affirm confidence is elaborated with positive reasoning and negative reasoning in fault diagnosis inference. The method is based on the fuzzy inference. The application examples of boiler system fault diagnosis are given.

Keywords boiler system; fault diagnosis; fuzzy affirm; confidence; fuzzy inference; expert system

1 引言

在领域专家的推理和决策过程中, 经常使用一些直觉、非形式的规则以及经验性知识来求解问题, 这些知识往往是不确定的、不精确的、不完备的, 一般以自然语言形式表达的定性描述。不确定性是自然语言固有的性质, 而这种不确定性主要表现为模糊性。例如, 锅炉出力不足、排烟温度过高、炉膛漏风严重等等。如何处理和应用这类不确定性知识是一个非常重要的问题。Zadeh 提出的基于模糊逻辑的近似推理是从一组具有不确定性的前提出发, 推出一个具有不确定性的结论, 这种推理大部分是定性的。事实上, 用定性、模糊的条件进行推理的能力是区分专家智能与机器智能的一个重要标志。专家系统采用不确定性推理就是处理领域专家知识的不确定性。

2 诊断知识模糊集合的描述

锅炉系统故障诊断专家系统采用的近似推理模型是以锅炉系统故障诊断问题为实际背景应用设计的。在故障诊断过程中, 主要涉及事实性知识(描述性知识)和综合决策性知识(过程性知识)。

2.1 事实性知识的模糊描述

事实性知识是人类对客观事物属性的描述。在故障诊断专家系统中, 事实性知识可用(模糊断言, 可信

本文于 1996 年 12 月 5 日收到

* 现工作单位: 北京建筑工程学院城建系暖通教研室

度)二元组构成的模糊命题来描述。在求解诊断问题进行综合决策时,领域专家在作出诊断决策的推理过程中,要考虑大量的求解实际工程诊断问题的模糊信息。这类模糊信息不仅来自人们在实践中对存在具体问题的描述所具有的模糊性,而且还来自人们主观认识能力所存在的模糊性。下面给出事实性知识的模糊集合描述。

设 U 为模糊命题、模糊特征、模糊关系组成的集合,为简单起见,模糊命题、模糊特征和模糊关系称为模糊断言,则一条事实性知识可表示为二元组 (P, β)

其中: P 为模糊断言, $P \in U$; β 为 P 的可信度, $\beta \in [0, 1]$ 。

例如: (锅炉燃烧状态差, 0.85), 这个事实可以理解为:

- 1) 锅炉燃烧状态差(用自然语言描述的模糊断言);
- 2) 锅炉燃烧状态差的可能性为 0.85 左右(领域专家给出模糊断言的可信度)。

又如: (锅炉受热管结垢, 0.75) 可以描述为锅炉受热管结垢的可能性为 0.75。

这种用模糊命题来描述事实性知识的方法对锅炉系统运行状态、故障发生的可能性及故障的影响程度的描述比较切合实际,也符合领域专家对诊断问题的表达方式。

2.2 决策诊断知识的模糊描述

决策诊断知识是指专家系统在进行故障诊断推理时所用的求解知识。首先,由面向对象基于框架、规则、模型与过程集成的广义故障树知识表示方法可以自动生成诊断规则,然后,将自动生成的诊断规则实例化为模糊产生式规则。

模糊产生式诊断规则的一般形式为

IF $w_1 * P_1 \quad w_2 * P_2 \quad \dots \quad w_n * P_n$

THEN $Q (CF, a)$

(1)

其中 P_i, Q 为模糊断言, $P_i (1 \leq i \leq n), Q \in U; w_i$ 为 P_i 的权重,即前件断言 P_i 对 Q 的影响程度, $\sum_{i=1}^n w_i = 1$; CF 为规则的可信度, $CF \in [0, 1]$; a 为判别是否可以应用该规则的阈值, $a \in [0, 1]$, 当规则的前件可信度 σ a 时,该规则才可用。

例如:

Rule1: IF 1) $w_1: 0.6$, 水处理不合格, and
 2) $w_2: 0.2$, 受热管局部汽化, and
 3) $w_3: 0.2$, 排污不及时,
 THEN 受热管结垢 (0.95, 0.75)

Rule2: IF 1) $w_1: 0.5$, 受热管结垢, or
 2) $w_2: 0.5$, 对流管束积灰, or
 3) $w_3: 0.5$, 水冷壁管结焦, and
 4) $w_4: 0.5$, 处理不及时,
 THEN 传热热阻增大 (0.90, 0.8)

为了使推理过程简单,在诊断规则的前提条件中将只考虑各模糊断言之间的与()运算关系,不考虑或()运算关系。而“ ”运算可分成多个“ ”运算来表示。

例如: IF $P (Q \quad R)$ THEN T

可分解成两条规则表示,即

IF $P \quad Q$ THEN T ,

IF $P \quad R$ THEN T 。

具有“ ”运算关系的两条规则的前件中的各个模糊断言可以赋予不同的权重,而且还可具有不同的阈值。这种情况与实际决策问题是相符合的,所以后一种表示方式更切合实际,更具有普通性。

例如规则 Rule2 分解成三条规则表示,即

- Rule4: IF 1) $w_1: 0.5$, 受热管结垢, and
2) $w_2: 0.5$, 清垢处理不及时,
THEN 传热热阻增大 (0.95, 0.8)
- Rule5: IF 1) $w_1: 0.5$, 对流管积灰, and
2) $w_2: 0.5$, 清灰处理不及时,
THEN 传热热阻增大 (0.92, 0.85)
- Rule6: IF 1) $w_1: 0.5$ 水冷壁管结焦, and
2) $w_2: 0.5$, 除焦处理不及时,
THEN 传热热阻增大 (0.90, 0.8)。

下面就模糊产生式规则推理过程的可信度传递进行深入讨论。

2.3 可信度的传递运算

可信度的传递运算分为正向推理传递运算和反向推理传递运算。

2.3.1 正向推理中可信度的传递运算

在下面推理中,可信度的传递运算涉及以下两个问题:

1) 由被激活的模糊产生式诊断规则前提条件中事实的可信度和相应的权重来计算该规则的结论的可信度。

2) m 个具有相同(结论)部分的规则均被激活,这些规则结论的可信度计算方法。

现就锅炉系统故障诊断专家系统中将由广义故障树诊断知识表示方法自动生成的诊断规则实例化为模糊产生式规则,并进行模糊推理时,可信度的传递运算问题进行讨论。

1) 当一条规则被激活时,其结论的可信度计算方法。

如上所述,一条规则实质上就是一条综合决策性诊断知识。对于多因素评判和综合决策问题,通常是采用加权平均求和方式,求出其综合的评价。

设规则(1)式前件中第 i 个子模糊断言 P_i 的权重为 $w_i(i=1,2,\dots,n)$,其对应事实的可信度为 β_i ,该规则的可信度为 CF ,应用阈值为 a_0 。如果这条规则满足条件:

$$\sigma = \sum_{i=1}^n w_i \cdot \beta_i \geq a \tag{2}$$

则可以应用该规则,称 σ 为该规则前件的可信度。而该规则结论 Q 具有可信度为:

$$\beta = CF \cdot \sigma = CF \sum_{i=1}^n w_i \cdot \beta_i \tag{3}$$

2) 当 m 个具有相同结论的规则被激活时,其结论的可信度计算方法。

$w_{11} \cdot P_{11} \quad w_{12} \cdot P_{12} \quad \dots \quad w_{1n} \cdot P_{1n} \quad Q \quad (CF_1, a_1)$
例如: \vdots (4)

$w_{m1} \cdot P_{m1} \quad w_{m2} \cdot P_{m2} \quad \dots \quad w_{mn} \cdot P_{mn} \quad Q \quad (CF_m, a_m)$

与模糊断言 $P_{ij}(i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n)$ 对应事实的可信度为 β_{ij} ,如果这 m 个规则前件的可信度分别满足条件:

$$\begin{aligned} \sigma_i &= \sum_{j=1}^n w_{ij} \cdot \beta_{ij} \geq a_1 \\ &\vdots \\ \sigma_m &= \sum_{j=1}^n w_{mj} \cdot \beta_{mj} \geq a_m \end{aligned} \tag{5}$$

则可应用这些规则,并且这些规则的结论 Q 具有可信度

$$\beta = \sum_{i=1}^m CF_i \cdot \sigma_i \tag{6}$$

其中
$$CF_i = \frac{CF_i}{\sum_{i=1}^m CF_i} \tag{7}$$

显然

$$\sum_{i=1}^m CF_i = 1$$

实例 1 设锅炉系统故障诊断专家系统数据库中已有下列事实: (受热管结垢, 0.85), (对流管束积灰, 0.9), (清垢处理不及时, 0.92), (清灰处理不及时, 0.8)。这时, 前面所述规则 Rule4 和 Rule5 被激活, 按 (2) 式求出它们前件的可信度:

$$\text{Rule4: } \alpha_4 = \sum_{i=1}^2 w_i \cdot \beta_i = 0.5 \times 0.85 + 0.5 \times 0.92 = 0.89 > a_4 = 0.8$$

$$\text{Rule5: } \alpha_5 = \sum_{i=1}^2 w_i \cdot \beta_i = 0.5 \times 0.9 + 0.5 \times 0.8 = 0.85 \quad a_5 = 0.85$$

所以规则 Rule4 和 Rule5 均可使用。而这两条规则有相同的结论, 即“传热热阻大”。由 (7) 式得:

$$CF_4 = \frac{0.95}{0.95 - 0.92} = 0.51$$

$$CF_5 = \frac{0.92}{0.95 - 0.92} = 0.47$$

则 (6) 式可得两条件规则结论 Q 的可信度为:

$$\beta = \sum_{i=4}^5 CF_i \cdot \sigma_i = 0.51 \times 0.89 + 0.47 \times 0.85 = 0.85$$

所以, 由已知事实推理诊断结果: 传热热阻大, 可信度为 0.85。

2.3.2 反向推理中可信度的传递运算

设诊断专家系统的模糊断言 Q 为当前的结论断言按反向链追踪, 并且有 m 个规则的结论断言与当前的结论断言相同, 其形式如 (4) 所示, 如果已知当前结论断言 Q 的可信度为 β , 则这 m 个规则前件具有可信度为

$$\sigma_i = CF_i \cdot \beta, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

其中 CF_i 为 (4) 式中第 i 个规则的可信度。

如果

$$\sigma_j = \max_{i=1}^k \{\sigma_i\} \quad (9)$$

则 (4) 式中的第 j 个规则的前件 $(w_{j1} \cdot P_{j1}, w_{j2} \cdot P_{j2}, \dots, w_{jn} \cdot P_{jn})$ 就被选为下一个要追踪的新的模糊断言。

以此类推, 这样就逐步连接起一条通向某叶结点模糊断言的规则链。当该叶结点模糊断言与用户输入的事实匹配时, 这一响应效果沿着推理链传播回到当前结论断言。如果当前结论断言 Q 的可信度 β 小于 (4) 式中第 j 条规则的阈值 a_j , 并且

$$\alpha_k = \max_{i=1}^n \{\sigma_i\} \quad (10)$$

则 (4) 式第 k 条规则的前件就被选为下一个要追踪的新的模糊断言。

如此进行, 直到上述传递过程结束时, 当前的结论断言被证实是最可能的模糊断言, 即在 (4) 中找到一条规则, 该规则的结论的可信度 β 大于或等于这条规则的阈值 a_k 。否则, 反向推理就从新的最有可能的结论断言开始。

实例 2 假定数据库中存在的现实: 锅炉 (传热热阻大, 0.85)。这时规则 Rule4, Rule5, Rule6 被激活, 按 (8) 式得:

$$\alpha_4 = CF_4 \cdot \beta = 0.95 \times 0.85 = 0.81$$

$$\alpha_5 = CF_5 \cdot \beta = 0.92 \times 0.85 = 0.78$$

$$\alpha_6 = CF_6 \cdot \beta = 0.95 \times 0.85 = 0.77$$

因为

$$\alpha_4 = \max\{0.81, 0.78, 0.77\} = 0.81$$

又当前结论断言: 传热热阻大的可信度

$$\beta = 0.85 > a_4 = 0.8$$

所以规则 Rule4 的前件: (受热管结垢), (清垢处理不及时) 被选为下一个要追踪的新的模糊断言。这时规则 Rule1 被激活, 该规则的前件为叶结点。而当前结论断言: 受热管结垢的可信度

$$\beta = \alpha_i = 0.81 > \alpha_1 = 0.75$$

所以规则 Rule1 可用, 其前件的可信度由(8)式可得:

$$\sigma_1 = CF_1 \cdot \beta = 0.95 \times 0.81 = 0.77$$

由此可见, 由给定事实: 锅炉(传热热阻大, 0.85)是由(受热管结垢, 0.81)引起, 原因是(0.6, 水处理不合格), (0.2 受热管局布汽化), (0.2, 排污不及时), 可信度为 0.77。

2.3.3 正反向推理中可信度的传递运算

当某条规则由前件匹配被激活时, 如果这条规则前件的可信度 σ 满足条件(5)式, 则诊断系统自动把该规则的结论断言作为反向链追踪的当前结论模糊断言, 并从知识库中搜出具有(4)式形式的并与当前结论断言相同的所有规则, 然后按(3)计算出当前结论断言的可信度 β , 按(8)式求得各规则前件的可信度 σ_i , 取

$$\sigma_j = \max_{i=1}^k \{\sigma_i\}$$

则第 j 个规则的前件被选为下一个要追踪的模糊断言。以后的传播过程类似反向推理的过程。

实例 3 设数据库中存在下列事实: (锅炉排烟温度高, 0.95), (炉膛温度正常, 0.9)。若知识库中有规则:

Rule7: IF 1) w_1 : 0.6, 锅炉排烟温度高, and
 2) w_2 : 0.4, 炉膛温度正常,
 THEN 传热热阻大(0.80, 0.85)

这时 Rule7 被激活, 按(2)式求出该规则前件的可信度为:

$$\sigma = \sum_{i=1}^2 w_i \cdot \beta_i = 0.6 \times 0.95 + 0.4 \times 0.9 = 0.93 > \alpha_7 = 0.85$$

所以规则 Rule7 的结论断言: 传热热阻大作为反向链追踪的当前结论模糊断言, 从而规则 Rule4, Rule5, Rule6 被激活。根据(6)式计算当前结论断言: 传热热阻大的可信度, 即

$$\beta = CF_i \cdot \sigma_i = 0.80 \times 0.93 = 0.85$$

这时, 数据库中有事实: 锅炉(传热热阻大, 0.85)。后面的反向推理过程与实例 2 相同, 这里不再多述。

3 结束语

本文以锅炉系统故障诊断为实际背景, 通过对领域专家在故障诊断中所考虑模糊信息的分析和研究, 提出了专家系统中基于诊断知识的模糊描述方法, 所建造专家系统的推理机制, 能够进行正向推理、逆向推理和双向推理, 并且给出模糊断言可信度的传递运算方法。通过应用实例来看, 推理结果与领域专家的推理结果相符。

参 考 文 献

- 1 汪培庄. 模糊集合论及其应用. 上海: 上海科学技术出版社, 1983
- 2 张跃, 邹寿平, 宿芬. 模糊数学方法及其应用. 北京: 煤炭工业出版社, 1992
- 3 虞和济, 侯广琳. 故障诊断的专家系统. 北京: 冶金工业出版社, 1991
- 4 张涵浮, 何正嘉. 模糊诊断原理及应用. 西安: 西安交通大学出版社, 1992
- 5 张跃, 张建明等. 专家系统中一类新的模糊推理模型 FRM. 模糊系统与数学, 增刊 6, 1992
- 6 Zadeh L A. The Role of Fuzzy Logic in the Management of Uncertainty in Expert Systems Fuzzy Sets and Systems, 1983, (11): 199~ 227
- 7 Zhang Yue Fuzzy Engineering in China Fuzzy Sets and Systems, 1989, 30: 359~ 361
- 8 Baldwin F A new Approach to Approximate Reasoning Using a Fuzzy Logic Fuzzy Sets and Systems, 1979: 309~ 325