

基于 T-S 模糊故障树的驱动电机冷却系统可靠性分析

柳炽伟, 郭美华

(中山职业技术学院 机电工程学院, 广东 中山 528403)

摘要: 车用驱动电机液压冷却系统存在故障机理不确定等问题。本文应用模糊数描述其故障概率和故障程度, 建立驱动电机冷却系统的 T-S 模糊故障树模型, 计算系统模糊可能性, 分析各部件的概率重要度和关键重要度, 找出影响系统可靠性的关键部件。

关键词: 电动汽车; 驱动电机; 冷却系统; T-S 模糊故障树; 可靠性分析

中图分类号: U462

文献标志码: A

文章编号: 1006-3331(2024)02-0019-07

Reliability Analysis of Hydraulic Cooling System for Drive Motor Based on T-S Fuzzy Fault Tree

LIU Chiwei, GUO Meihua

(Institute of Mechanical and Electrical Engineering, Zhongshan Polytechnic, Zhongshan 528403, China)

Abstract: The hydraulic cooling system of the drive motor for vehicles has problems of uncertain fault mechanisms. This paper uses fuzzy numbers to describe the probability and degree of faults, establishes the T-S fuzzy fault tree model of the drive motor cooling system, calculates the fuzzy possibility of the system, analyzes the probability and critical importance of each component, and identifies the key components that affect the reliability of the system.

Key words: electric vehicle; drive motor; cooling system; T-S fuzzy fault tree; reliability analysis

1 概述

电动汽车驱动电机冷却不良会导致其温度过高, 影响电机性能, 严重的会引起电机转子中永磁体产生不可逆的热退磁现象, 还会使电机绝缘材料发生质变失去绝缘能力。电机控制器和电源变换器等装置内的电子元件和模块也会因温度过高而被烧毁。目前, 水冷是车用驱动电机的主要冷却方式^[1]。因此进行电动汽车驱动电机冷却系统可靠性研究, 对延长电动汽车使用寿命、提高安全性和故障诊断效率等都具有重要意义。

故障树分析(FTA)是较为广泛使用的复杂系统可靠性分析方法之一。传统的基于布尔代数和概率

论的二态故障树分析方法, 需要已知精确的底事件概率且逻辑门关系明确, 限制了其应用范围^[2-3]。采用模糊数来描述底事件的模糊故障树模型, 解决了底事件故障概率不确定问题, 但其因果关系仍以“与或门”“表决门”等逻辑关系为主, 不能对多态问题和故障机理不明确问题进行分析^[4-5]。

近年发展较快的 T-S 模糊故障树模型, 以 T-S 门代替传统逻辑门来表达上下级关系, 用模糊数描述底事件故障程度, 以模糊可能性表征事件概率, 在解决复杂系统的多态故障、机理不明故障、故障概率不确定性等方面具有优势, 逐渐在可靠性及故障诊断领域得到研究和应用^[6-8]。

收稿日期: 2023-11-03。

基金项目: 2023 年广东省普通高校特色创新类项目(2023KTSCX367); 2020 年度中山市第二批社会公益与基础研究项目(2020B2028); 2023 年度中山职业技术学院科研项目(KYB2303)。

第一作者: 柳炽伟(1970—), 硕士; 副教授; 主要从事汽车检测与诊断技术, 汽车可靠性、维修决策等研究工作。E-mail: luke1011@sohu.com。

针对电动汽车驱动系统结构紧凑、使用工况复杂多变的状况,结合冷却系统故障发生的渐进性、模糊性,以及缺乏精确的故障率数据等特点,本文通过专家经验与历史数据结合获得底事件故障的模糊可能性,使用 T-S 模糊故障树进行驱动电机冷却系统可靠性分析和重要度计算,为电动汽车可靠性的优化和维修诊断提供参考。

2 T-S 模糊故障树的理论基础

2.1 事件的模糊数描述方法

如前所述,电动汽车驱动系统故障的程度难以用精确的数值来表示,为此引入模糊逻辑,将故障概率、故障程度用区间 $[0,1]$ 上的模糊数来表示。如通常用 0、0.5、1 等来描述故障程度,分别表示无故障、中度故障和完全故障。描述故障概率的模糊数,其隶属函数可以是三角形、正态、梯形函数等。为方便使用和不失一般性,选用图 1 所示的梯形隶属函数来描述事件的模糊隶属度:

$$F \equiv (F_0, s_l, f_l, s_r, f_r) \quad (1)$$

式中: F_0 为模糊数支撑集中心; s_l 和 s_r 表示左右支撑半径; f_l 和 f_r 表示左右模糊区,其大小反映了模糊数的模糊程度。

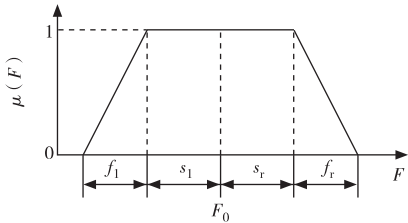


图 1 模糊数的隶属函数

由图 1 可得出梯形模糊数的隶属函数表达式:

$$\mu(F) = \begin{cases} 0 & (0 \leq F \leq F_0 - s_l - f_l) \\ \frac{F - (F_0 - s_l - f_l)}{f_l} & (F_0 - s_l - f_l < F \leq F_0 - s_l) \\ 1 & (F_0 - s_l < F \leq F_0 + s_r) \\ \frac{(F_0 + s_r + f_r) - F}{f_r} & (F_0 + s_r < F \leq F_0 + s_r + f_r) \\ 0 & (F_0 + s_r + f_r < F) \end{cases} \quad (2)$$

由式(2)可知,当模糊数的左右支撑半径均为 0 时,梯形隶属函数变为三角形隶属函数;当支撑半径和左右模糊区间均为 0 时,模糊数变为确定值。可见梯形隶属函数具有简洁、普适性强的特点。通过模糊数来描述概率,解决了底事件故障的精确概率难以获取的问题,能将专家对程度、范围的描述通过数字的形式表达出来。

2.2 T-S 模糊门算法

T-S 故障树模型作为一种逻辑推理模型,由一系列 if-then 模糊规则组成,可描述复杂系统的多态逻辑关系。T-S 模糊门描述如下:

在 T-S 故障树中,在已知规则 $l (l=1, 2, \dots, m)$ 下,有 n 个底事件输入变量 $x(x_1, x_2, \dots, x_n)$, y_l 为上级事件输出变量。底事件的模糊集为 $F_{f_j} (j=1, 2, \dots, n)$, 对应的隶属函数为 $\mu_{F_{f_j}}(x_j)$, 则该 T-S 门的输出为

$$y = \sum_{l=1}^m \beta_l^*(x) y_l \quad (3)$$

$$\beta_l^*(x) = \beta_l(x) / \sum_{l=1}^m \beta_l(x) \quad (4)$$

$$\beta_l(x) = \prod_{j=1}^n \mu_{F_{f_j}}(x_j) \quad (5)$$

式中: $\beta_l(x)$ 为模糊规则 l 的执行度; $\beta_l^*(x)$ 是 $\beta_l(x)$ 归一化后的值。

假设基本事件 $x(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 的故障程度分别描述为模糊数 $(x_1^1, x_1^2, \dots, x_1^{k_1})$, $(x_2^1, x_2^2, \dots, x_2^{k_2})$, $\dots$, $(x_n^1, x_n^2, \dots, x_n^{k_n})$, 上级事件 y 故障程度描述为 $(y^1, y^2, \dots, y^{k_y})$, 则该 T-S 门对应规则的数量为

$$m = \prod_{i=1}^n k_i \quad (6)$$

同时故障树中各个事件满足以下条件:

$$\begin{cases} 0 \leq x_1^1 \leq x_1^2 \leq \dots \leq x_1^{k_1} \leq 1 \\ 0 \leq x_2^1 \leq x_2^2 \leq \dots \leq x_2^{k_2} \leq 1 \\ \vdots \\ 0 \leq x_n^1 \leq x_n^2 \leq \dots \leq x_n^{k_n} \leq 1 \\ 0 \leq y^1 \leq y^2 \leq \dots \leq y^{k_y} \leq 1 \end{cases} \quad (7)$$

则通过 T-S 模糊门可得到以下算法:

1) 已知部件故障程度的模糊可能性,计算上级事件故障的模糊可能性。在规则 $l (l=1, 2, \dots, m)$ 下,

设每个基本事件所对应故障程度的模糊可能性分别为 $P(x_1^{i_1}), P(x_2^{i_2}), \dots, P(x_n^{i_n})$, 输出事件 y 为 y^{k_y} 的模糊可能性为 $P^l(y^{k_y})$ 。其中: $i_1 = 1, 2, \dots, k_1; i_2 = 1, 2, \dots, k_2; \dots; i_n = 1, 2, \dots, k_n$ 。则 l 执行的可能性为

$$P_0^l = P(x_1^{i_1})P(x_2^{i_2}) \cdots P(x_n^{i_n}) \quad (8)$$

进而得到上级事件的模糊可能性为

$$\begin{cases} P(y^1) = \sum_{i=1}^m P_0^l P^l(y^1) \\ P(y^2) = \sum_{i=1}^m P_0^l P^l(y^2) \\ \vdots \\ P(y^{k_y}) = \sum_{i=1}^m P_0^l P^l(y^{k_y}) \end{cases} \quad (9)$$

2) 已知部件故障状态, 计算上级事件模糊可能性。假设已知底事件 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 的故障程度记为 $x' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_n)$, 则由 T-S 模型可估计出上级事件的模糊可能性

$$\begin{cases} P(y^1) = \sum_{l=1}^m \beta_l^*(x') P^l(y^1) \\ P(y^2) = \sum_{l=1}^m \beta_l^*(x') P^l(y^2) \\ \vdots \\ P(y^n) = \sum_{l=1}^m \beta_l^*(x') P^l(y^n) \end{cases} \quad (10)$$

$$\beta_l^*(x') = \prod_{j=1}^n \mu_{x_j^{i_j}}(x'_j) / \sum_{l=1}^m \prod_{j=1}^n \mu_{x_j^{i_j}}(x'_j) \quad (11)$$

其中, $\mu_{x_j^{i_j}}(x'_j)$ 表示第 l 条规则中 x'_j 对相应模糊集的隶属度。

2.3 T-S 模糊故障树重要度分析

重要度描述底事件发生概率对顶事件的影响程度, 其对可靠性设计、故障诊断等具有重要作用。

2.3.1 T-S 概率重要度

底事件 x_j 故障程度为 $x_j^{i_j}$ 的模糊可能性为 $P(x_j^{i_j})$ ($i_j = 1, 2, \dots, k_j$), 对系统顶事件 T 为 T_q 的概率重要度为

$$I_{T_q}^{Pr}(x_j^{i_j}) = P[T_q, P(x_j^{i_j}) = 1] - P[T_q, P(x_j^{i_j}) = 0] \quad (12)$$

其中 $P[T_q, P(x_j^{i_j}) = 1]$ 表示当部件 x_j 故障程度为 $x_j^{i_j}$ 的模糊可能性 $P(x_j^{i_j}) = 1$ 时, 引起系统顶事件 T

为 T_q 的模糊可能性。 $P[T_q, P(x_j^{i_j}) = 0]$ 表示 $P(x_j^{i_j}) = 0$ 时引起系统顶事件 T 为 T_q 的模糊可能性。

综合底事件各个故障程度的 T-S 概率重要度, 得到底事件的 T-S 概率重要度:

$$I_{T_q}^{Pr}(x_j) = \sum_{i_j=1}^{k_j} I_{T_q}^{Pr}(x_j^{i_j}) / k'_j \quad (13)$$

式中: k'_j 表示第 j 个底事件的非 0 故障程度的个数, 比如故障程度用模糊数 0、0.5、1 描述, 则 k'_j 为 2。

2.3.2 T-S 关键重要度

底事件 x_j 的故障程度 $x_j^{i_j}$ 的模糊可能性 $P(x_j^{i_j})$ ($i_j = 1, 2, \dots, k_j$) 对系统顶事件 T 为 T_q 的 T-S 关键重要度为

$$I_{T_q}^{Cr}(x_j^{i_j}) = P(x_j^{i_j}) I_{T_q}^{Pr}(x_j^{i_j}) / P(T = T_q) \quad (14)$$

$$I_{T_q}^{Cr}(x_j) = \sum_{i_j=1}^{k_j} I_{T_q}^{Cr}(x_j^{i_j}) / k'_j \quad (15)$$

式中: $P(T = T_q)$ 表示顶事件 T 为 T_q 的概率。

可见关键重要度含有部件的概率重要度、部件与系统的故障概率比两方面, 能更客观地体现部件对系统故障的影响程度。

3 驱动电机冷却系统可靠性分析

3.1 建立 T-S 模糊门规则

车用驱动电机铁损、铜损、永磁损耗和机械损耗的能量会转换为热能。电机控制器(含逆变器)、车载充电机、DC/DC 变换器内部功率器件均会在运行过程中大量生热, 需要在其壳体上制造各种形状的水道, 通过冷却系统的液流将热量带走, 液流经过散热器时将热量传导至空气中。冷却液流的压力由电泵产生, 散热器通过装配在后面的散热风扇加速散热。液泵和风扇的转速均由整车控制器根据温度信号按既定的各种模式运行^[9-10]。

以某乘用车永磁同步电机冷却系统为例, 以“驱动电机温度过高”为顶事件 T , 假设所有事件的故障程度为 (0, 0.5, 1), 依据历史数据和专家经验, 作出其 T-S 模糊故障树如图 2 所示。图 2 中的故障树有 12 个 T-S 门规则, 除顶事件 T 外, A、B、C、D 代表不同层级的中间事件, $X_1 \sim X_{21}$ 代表 21 个底事件, 具体事件代码的含义见表 1。

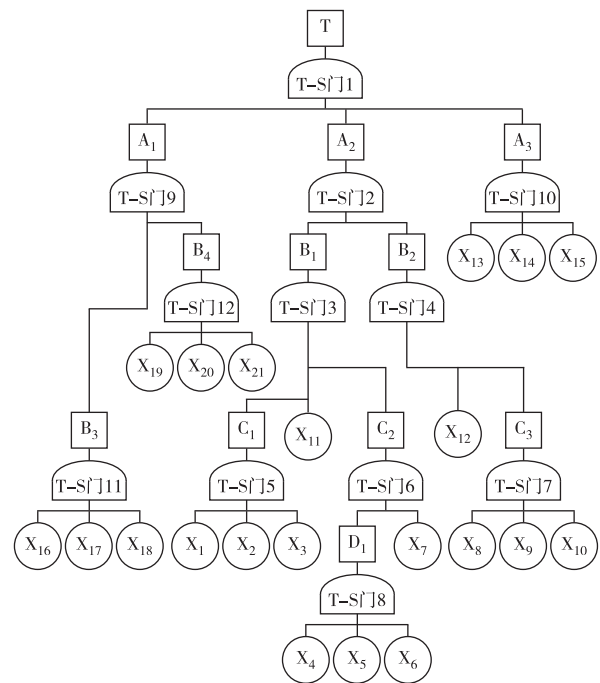


图 2 电机过热的 T-S 故障树

表 1 故障树事件代码表

代码	事件	代码	事件
T	电机温度过高报警	X ₆	膨胀水箱泄漏
A ₁	部件运作异常发热	X ₇	冷却液变质
A ₂	冷却系统散热不良	X ₈	散热风扇损坏
A ₃	温度信号故障	X ₉	风扇线束故障
B ₁	冷却液循环不良	X ₁₀	风扇继电器故障
B ₂	散热器换热不良	X ₁₁	散热器堵塞
B ₃	电机故障	X ₁₂	散热器脏污
B ₄	电源变换装置故障	X ₁₃	电机温度传感器故障
C ₁	电泵工作压力不足	X ₁₄	电机控制器温度传感器故障
C ₂	冷却液异常	X ₁₅	电源变换装置温度传感器故障
C ₃	散热风扇故障	X ₁₆	电机定子短路故障
D ₁	冷却液泄漏	X ₁₇	转子故障
X ₁	电泵劣化损坏	X ₁₈	过载
X ₂	电泵线束故障	X ₁₉	逆变器 IGBT 故障
X ₃	电泵继电器故障	X ₂₀	DC/DC 变换器故障
X ₄	输水管路泄漏	X ₂₁	车载充电机故障
X ₅	散热器泄漏		

表 2 为图 2 中 T-S 门 5 的模糊规则,其中编号 4 的规则表示:当 X_1 、 X_2 、 X_3 故障程度分别为 0、0.5 和 0 时,导致 C_1 故障程度为 (0, 0.5, 1) 的可能性为

(0.3, 0.7, 0)。

表 2 T-S 门 5 的模糊规则

规则编号	X_1	X_2	X_3	C_1		
				0	0.5	1
1	0	0	0	1	0	0
2	0	0	0.5	0.1	0.6	0.3
3	0	0	1	0	0	1
4	0	0.5	0	0.3	0.7	0
5	0	0.5	0.5	0	0.4	0.6
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
27	1	1	1	0	0	1

3.2 系统模糊可能性计算

3.2.1 通过部件模糊故障率计算顶事件“电机温度过高报警”的模糊可能性

分析电动车运行的历史数据,以及采用信心指数修正的专家调查法调研^[11],可得到对应的各底事件故障程度为 1 时的模糊故障率,详见表 3。同时,为便于计算推理,假设各底事件故障状态为 0.5 和 1 时概率相等。

表 3 底事件的模糊故障率值

代码	模糊故障率/(10^{-6})	代码	模糊故障率/(10^{-6})
X ₁	(1.745, 2.205, 2.773)	X ₁₂	(3.088, 4.162, 5.145)
X ₂	(0.604, 0.847, 1.105)	X ₁₃	(1.229, 1.549, 2.015)
X ₃	(2.051, 2.618, 3.150)	X ₁₄	(1.412, 1.857, 2.297)
X ₄	(6.277, 8.233, 10.518)	X ₁₅	(1.139, 1.518, 1.898)
X ₅	(2.363, 3.214, 4.188)	X ₁₆	(0.778, 0.936, 1.155)
X ₆	(0.791, 1.051, 1.295)	X ₁₇	(1.660, 2.213, 2.766)
X ₇	(0.183, 0.257, 0.318)	X ₁₈	(2.534, 3.245, 4.156)
X ₈	(1.601, 2.165, 1.516)	X ₁₉	(1.536, 2.181, 2.827)
X ₉	(0.605, 0.754, 0.923)	X ₂₀	(0.671, 1.028, 1.285)
X ₁₀	(2.479, 3.135, 4.026)	X ₂₁	(0.985, 1.378, 1.745)
X ₁₁	(0.488, 0.677, 0.914)		

顶事件模糊可能性是利用各 T-S 门算法,由最底层事件模糊可能性逐层向上推算得到。为便于理解,本文以规则较少的 T-S 门 4(表 4)为例,介绍 T-S 门模糊可能性的计算过程。

表4 T-S 门4的模糊规则

规则编号	X_{12}	C_3	B_2		
			0	0.5	1
1	0	0	1	0	0
2	0	0.5	0.2	0.8	0
3	0	1	0	0	1
4	0.5	0	0.3	0.7	0
5	0.5	0.5	0	0.4	0.6
6	0.5	1	0	0	1
7	1	0	0	0.7	0.3
8	1	0.5	0	0	1
9	1	1	0	0	1

1) 用 T-S 门 7 算出 C_3 故障程度为 0.5 和 1 时的模糊可能性分别为 $(3.032, 3.924, 4.963) \times 10^{-6}$ 和 $(5.429, 6.995, 8.873) \times 10^{-6}$ 。

2) 根据式(8)、式(9), 可得

$$P(B_2 = 0.5) = \sum_{l=1}^9 P_0^l P^l(B_2 = 0.5) = P_0^3 \times 0.8 + P_0^4 \times 0.7 + P_0^5 \times 0.4 + P_0^7 \times 0.7 = (6.748, 8.966, 11.173) \times 10^{-6}$$

$$P(B_2 = 1) = \sum_{l=1}^9 P_0^l P^l(B_2 = 1) = P_0^3 + P_0^5 \times 0.6 + P_0^6 + P_0^7 \times 0.3 + P_0^8 + P_0^9 = (6.355, 8.243, 10.416) \times 10^{-6}$$

3) 由计算结果可知, B_2 模糊故障可能性比底事件 X_{12} 大了一倍, 但仍在同一数量级上; 其中度故障的模糊可能性比严重故障的模糊可能性稍高, 符合实际情况。

4) 因 X_{12} (散热器脏污) 主要指外部沾积尘泥、树叶等脏物和内部水道积垢等情况, 这是一个渐进的过程。在散热风扇正常时, 它会造成散热器换热性能慢慢下降, 出现水温偏高情况 (故障程度 0.5), 并持续较长时间。一旦同时出现风扇电机碳刷磨损或继电器触点性能劣化, 转速变慢 (即故障程度 0.5) 或风扇停转等情况, 就会出现冷却液温度过高等严重故障。可见依据专家经验建立的 T-S 门能够较好地反映多态模糊故障的状况。

5) 同理, 计算出系统中其他中间事件的模糊可

能性, 详见表 5。

表5 中间事件的模糊可能性

代码	模糊可能性/(10^{-6})	
	故障状态 0.5	故障状态 1
A_1	(4.642, 6.478, 8.230)	(5.051, 6.737, 8.465)
A_2	(9.224, 12.220, 15.429)	(22.411, 29.371, 37.155)
A_3	(3.329, 4.358, 5.485)	(3.210, 4.165, 5.261)
B_1	(10.350, 13.682, 17.450)	(11.601, 15.230, 19.270)
B_2	(6.748, 8.966, 11.173)	(6.355, 8.243, 10.416)
B_3	(1.890, 2.440, 3.055)	(3.455, 4.443, 5.537)
B_4	(4.149, 5.963, 7.614)	(1.596, 2.294, 2.929)
C_1	(2.699, 3.445, 4.289)	(5.015, 6.455, 7.972)
C_2	(2.216, 2.950, 3.762)	(12.638, 16.761, 21.466)
C_3	(3.032, 3.924, 4.963)	(5.429, 6.995, 8.873)
D_1	(6.839, 9.064, 11.589)	(9.035, 11.972, 15.353)

6) 进一步计算得到顶事件 T 发生的模糊可能性为:

$$P(T=0.5) = (11.371, 15.267, 19.303) \times 10^{-6}$$

$$P(T=1) = (35.109, 46.191, 58.355) \times 10^{-6}$$

由该结果分析, 系统故障的模糊可能性比底事件高了一个数量级, 严重程度的故障模糊可能性比中等故障程度的模糊可能性要高近 3 倍。因为系统顶事件包含 21 个并联关系的底事件, 每个底事件都是最小割集, 均可能导致系统故障发生。较多的电路电器常为 0, 1 二态表现, 且故障程度为 1 的 1 个底事件发生或 2 个程度为 0.5 的底事件同时发生, 即导致系统发生严重故障, 因此系统严重故障的模糊可能性较中等程度故障的更高。

3.2.2 已知部件故障状态计算顶事件模糊可能性

如果不能确定车辆零部件的故障概率, 可通过行驶里程的估算, 或在维护过程得到它们的故障状态, 利用 T-S 模糊故障树模型求出顶事件在不同故障程度下的模糊可能性。

在图 1 所示的故障模糊隶属函数中, 取模糊故障程度的隶属函数参数为 $s_1 = s_r = 0.15, f_1 = f_r = 0.2$ 。各底事件的故障状态如下: $X_1, X_4, X_6, X_{12}, X_{18}, X_{20}$ 是 0.1, $X_3, X_7, X_{11}, X_{15}, X_{21}$ 是 0.2, $X_2, X_8, X_9, X_{13}, X_{16}, X_{17}$ 是 0.3, $X_5, X_{10}, X_{14}, X_{19}$ 是 0.4。以表 2 的 T-S 门

5 为例,结合式(2)得到 X_1 、 X_2 、 X_3 的故障模糊集隶属度情况,详见表 6。

表 6 T-S 门 5 中底事件隶属度

规则编号	隶属度			C ₁ 故障状态		
	X ₁	X ₂	X ₃	0	0.5	1
1	1	0.25	0.75	1	0	0
2	1	0.25	0.25	0.2	0.5	0.3
3	1	0.25	0	0	0	1
4	1	0.75	0.75	0.3	0.7	0
5	1	0.75	0.25	0	0.4	0.6
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
27	0	1	0	0	0	1

1) 由式(10)、式(11)和表 6 计算得到 $P(C_1=0)=0.369$, $P(C_1=0.5)=0.50$, $P(C_1=1)=0.131$ 。

2) 同理可求得其他中间事件在不同故障程度下的模糊可能性。

3) 将中间事件的模糊可能性代替隶属度,最后求得顶事件不同故障程度的模糊可能性为: $P(T=0)=0.075$, $P(T=0.5)=0.650$, $P(T=1)=0.275$ 。

4) 计算结果显示,在各底层零部件存在上述轻微程度故障时,引起系统一般故障发生的模糊可能性较高,有近三成机会发生严重故障。

3.3 部件的重要度分析

为提高可靠性设计及故障诊断效率,对底事件(部件)的重要度进行分析,找到系统不同故障程度下的关键影响因素。事件模糊可能性值取中间值,先分别求得各部件对顶事件在 0.5、1 两种故障程度下 T-S 概率重要度,再结合部件的模糊可能性,计算其关键重要度。例如底事件 X_1 对系统故障程度为 1 的概率重要度、关键重要度计算如下:

1) 根据式(12)、式(13)可得 X_1 对顶事件 T 完全故障的 T-S 概率重要度:

$$I_1^{Pr}(x_1^{0.5}) = P[T_1, P(x_1^{0.5}) = 1] - P[T_1, P(x_1^{0.5}) = 0] = 0.096$$

$$I_1^{Pr}(x_1^1) = P[T_1, P(x_1^1) = 1] - P[T_1, P(x_1^1) = 0] = 0.672$$

$$I_1^{Pr}(x_1) = [I_1^{Pr}(x_1^{0.5}) + I_1^{Pr}(x_1^1)] / 2 = 0.682$$

2) 根据式(14)、式(15)得到 X_1 对顶事件 T 完全

故障的 T-S 关键重要度:

$$I_1^{Cr}(x_1^{0.5}) = P(x_1^{0.5}) I_1^{Pr}(x_1^{0.5}) / P(T=1) = 0.0177$$

$$I_1^{Cr}(x_1^1) = P(x_1^1) I_1^{Pr}(x_1^1) / P(T=1) = 0.0485$$

$$I_1^{Cr}(x_1) = \sum_{i_j=0.5,1} I_1^{Cr}(x_1^{i_j}) / 2 = 0.0419$$

3) 同理可计算出其他底事件的概率重要度和关键重要度。计算结果按重要度排序,可找到影响系统可靠性的关键因素。表 7 是计算所得各底事件对顶事件部分故障和完全故障的概率重要度和关键重要度数据。

表 7 底事件的概率重要度和关键重要度

代码	$I_{0.5}^{Pr}(x_j)$	$I_1^{Pr}(x_j)$	$I_{0.5}^{Cr}(x_j)$	$I_1^{Cr}(x_j)$
X ₁	0.096	0.580	0.014	0.028
X ₂	0.096	0.580	0.005	0.011
X ₃	0.089	0.672	0.015	0.039
X ₄	0.143	0.458	0.076	0.084
X ₅	0.143	0.458	0.030	0.033
X ₆	0.122	0.385	0.008	0.009
X ₇	0.157	0.585	0.003	0.003
X ₈	0.118	0.590	0.017	0.028
X ₉	0.118	0.590	0.006	0.010
X ₁₀	0.101	0.727	0.020	0.051
X ₁₁	0.210	0.540	0.009	0.008
X ₁₂	0.294	0.374	0.079	0.035
X ₁₃	0.175	0.675	0.018	0.023
X ₁₄	0.175	0.675	0.021	0.028
X ₁₅	0.325	0.575	0.032	0.019
X ₁₆	0.122	0.785	0.007	0.016
X ₁₇	0.171	0.699	0.025	0.034
X ₁₈	0.318	0.341	0.007	0.002
X ₁₉	0.364	0.354	0.051	0.017
X ₂₀	0.364	0.354	0.024	0.008
X ₂₁	0.364	0.354	0.033	0.011

4) 对系统完全故障的概率重要度排序,前 5 个部件是 X₁₆、X₁₀、X₁₇、X₁₄、X₁₃,它们对系统完全故障发生的概率绝对值影响大,在系统可靠性优化设计时应考虑提高它们的可靠性。

5) 对系统完全故障的关键重要度排序,前 4 个部件是 X₄、X₁₀、X₃、X₁₂,即输水管路泄漏、散热风扇继电

器、电泵继电器、散热器脏污等事件对系统完全故障发生的概率影响程度相对其他部件更大,其物理意义与实际经验吻合。通常这些部件在使用过程中发生故障的概率较高,一旦发生故障会导致系统的散热器无法正常换热,或使冷却液流动缓慢甚至不流动,这必然导致电机冷却系统温度过高,诊断相关故障时可先关注这些影响因素。

4 结束语

本文利用 T-S 模糊故障树分析车用驱动电机冷却系统的可靠性,引入了故障程度概念,可通过底事件模糊可能性或故障程度推算出系统故障的模糊可能性,解决了零部件故障概率和故障机理不确定性问题,更高效地实现液压冷却系统等复杂系统多态问题的推理。

根据专家经验和历史数据建立了车用驱动电机液压冷却系统 T-S 门及其模糊故障树,通过计算概率重要度和关键重要度,找到了车用驱动电机液压冷却系统失效的关键因素,为系统可靠性提升和故障诊断决策提供了参考依据。

参考文献:

- [1] 刘慧军,陈芬放,黄瑞,等. 车用驱动电机冷却系统仿真研究[J]. 中南大学学报,2020,51(7): 2002-2012.
- [2] WANG Jianjun,ZHAO Jingyi,LI Wenle,et al. Reliability analysis and calculation of the drive hydraulic system group of combined transportation[J]. Machine Tool&Hydraulics,2020,48(24):13-20.
- [3] 田世贺,李小波,程岳梅,等. 基于现场数据的地铁车辆牵引系统可靠性分析[J]. 智能计算机与应用,2021,11(2): 64-68.
- [4] 孙利娜,黄宁,仵伟强,等. 基于 T-S 模糊故障树的多态系统性能可靠性[J]. 机械工程学报,2016,52(10): 192-198.
- [5] 柳炽伟. 汽车 AMT 液压系统的模糊可靠性分析[J]. 农业装备与车辆工程,2014,52(2): 48-51.
- [6] 李翠玉,孙信民,蒋旭,等. 基于 T-S 模糊故障树的家用空调可靠性分析[J]. 机械设计,2021,38(2): 120-126.
- [7] 徐廷学,王凤芹,李志强. 基于 T-S 模糊故障树方法的惯性导航系统可靠性评估[J]. 测控技术,2022,41(2): 49-56.
- [8] 白斌,张俊一,周策,等. 基于 T-S 模糊故障树的工业机器人可靠性分析[J]. 机械强度,2021,43(6): 1348-1358.
- [9] 柴保明,李文选,苏茹茹,等. 基于故障树的电机温度过高故障诊断分析[J]. 煤矿机械,2012,33(2): 245-246.
- [10] 孙海燕,郑星,史立伟,等. 电动汽车水冷式永磁同步电机设计与分析[J]. 科学技术与工程,2019,19(13): 87-91.
- [11] 周亚辉,齐金平,李少雄,等. 基于 T-S 模糊故障树的制动系统可靠性分析[J]. 实验室研究与探索,2021,40(6): 24-28.

《客车技术与研究》投稿须知

文稿须为作者原创,不存在抄袭、侵权、涉密、一稿多投和重复发表等学术不端问题。作者享有文稿的著作权,文责由作者自负。

稿件须具有科学性、创新性、真实性、实用性,选题新颖、内容正确、结构合理、文字流畅。

为促进学术交流,扩大交流渠道,刊用的稿件将自动进入“中国期刊全文数据库”“万方数据——数字化期刊群”和“中文科技期刊数据库”等,如不同意文章被收录,请来稿时声明。