

汽车驱动桥系统模糊故障树分析研究

李彦锋^{1,2}, 杜丽¹, 肖宁聪¹, 黄洪钟^{1,2}, 苗强¹

(1. 电子科技大学机械电子工程学院, 610054, 成都; 2. 重庆理工大学汽车零部件制造及检测技术教育部重点实验室, 400050, 重庆)

摘要: 应用模糊故障树分析方法对汽车驱动桥系统的可靠性进行了研究, 简要介绍了模糊故障树分析方法的基本理论和汽车驱动桥系统的基本结构, 建立了汽车驱动桥系统的故障树. 采用上行法求解所建立的故障树的最小割集, 用三角型及正态型模糊数描述底事件发生概率的区间表示方式和计算方法, 对所建立的故障树进行了定量计算. 以某汽车驱动桥为实例, 对相关方法的应用进行了分析, 结果表明, 应用三角型和正态型模糊数方法的计算结果差别不大, 轴承磨损失效是该汽车驱动桥分系统失效的关键事件.

关键词: 故障树; 模糊数; 模糊故障树; 驱动桥

中图分类号: O346; TB114.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)07-0110-05

Fuzzy Fault Tree Analysis for Auto Drive Axle System

LI Yanfeng^{1,2}, DU Li¹, XIAO Ningcong¹, HUANG Hong-zhong^{1,2}, MIAO Qiang¹

(1. School of Mechatronics Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China;
2. Key Laboratory of Manufacture and Test Techniques for Automobile Parts (Chongqing University of Technology),
Ministry of Education, Chongqing 400050, China)

Abstract: An fuzzy fault tree analysis for automobile drive axle system was proposed. The theory of fuzzy fault tree was introduced as well as the structure of automobile drive axle, the fault tree of the automobile drive axle system was established. The ascending method was used to find minimal cutting sets. The fuzzy numbers were employed to describe the fault probability. Furthermore, the interval representation and calculation strategy were presented when both triangular fuzzy number and normal fuzzy number were chosen to describe the fault probability. An example of a automobile drive axle system shows that the difference between fuzzy fault tree with triangular fuzzy number and normal fuzzy number is not significant and bearing wear is the key failure event in this automobile drive axle.

Keywords: fault tree; fuzzy number; fuzzy fault tree; drive axle

故障树分析方法是分析复杂系统可靠性的一种有效工具, 常规的基于布尔代数和概率论的系统故障树分析的理论研究已取得了丰硕成果, 在工程应用上也取得了许多成绩. 由于在理论分析时常规故障树方法将底事件发生的概率视为精确值^[1], 而在实际工程问题中, 顶事件(系统故障)和底事件(零部

件故障)发生的概率往往同时存在着随机性和模糊性, 因此更适合应用模糊数学进行分析^[2].

本文以汽车驱动桥系统为例, 应用模糊数学对驱动桥系统异响故障进行模糊故障树分析, 并对其零部件进行重要度分析, 以确定出该总成的关键零部件.

1 模糊故障树分析方法的基本理论

1.1 故障树分析方法

故障树分析方法 (Fault Tree Analysis, 简称 FTA) 是系统可靠性分析的重要方法之一,它是一种图形演绎方法,以系统最不希望发生的事件——顶事件为分析目标,应用逻辑演绎的方法研究顶事件发生的各种直接与间接原因. 采用逻辑门将各个原因联系起来,通过层层深入分析,建立起一个倒立的树状图,指出零部件故障与系统故障之间的逻辑关系. 对故障树进行定性分析,可求出顶事件发生的最小割集,即系统最薄弱的环节. 通过对故障树的定量分析,可求出顶事件发生的概率以及其他定量指标,如底事件结构和概率的重要度等^[3-4].

1.2 模糊数

本文采用模糊数来描述故障事件发生的概率. 例如,假定某个零部件失效的概率介于 0.02~0.03 之间,很可能在 0.027 左右,这就可用一个模糊数来描述它. 采用模糊数来描述事件发生的概率,既能减少获取事件发生概率精确值的难度,又能结合工程技术人员的实际经验和判断来构造模糊数的隶属函数,因此这种方法具有较大的灵活性和适应性^[2,4-6].

通常采用参照函数来描述模糊数 A , 设 L, R 为模糊数的参照函数,若有

$$\mu_A(x) = \begin{cases} L((m-x)/\alpha) & x \leq m, \alpha > 0 \\ R((x-m)/\beta) & x \geq m, \beta > 0 \end{cases} \quad (1)$$

则称模糊数 A 为 L - R 型模糊数,并记为 $A = (m, \alpha, \beta)_{LR}$. 式中: m 为 A 的均值; α, β 分别为 A 的置信上、下限; $\mu_A(x)$ 为 A 的隶属函数. 当 α, β 等于 0 时, A 不是模糊数而是常规的清晰数. α, β 越大, A 越模糊^[7]. L - R 型模糊数的隶属函数有多种形式,常见的有三角型和正态型,如图 1 和图 2 所示.

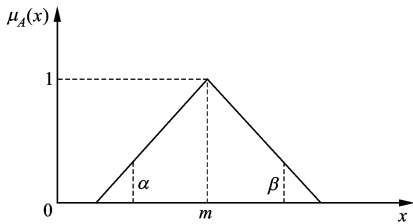


图 1 三角型隶属函数示意图

1.2.1 三角型隶属函数 三角型模糊数的隶属函数为

$$\mu_A(x) =$$

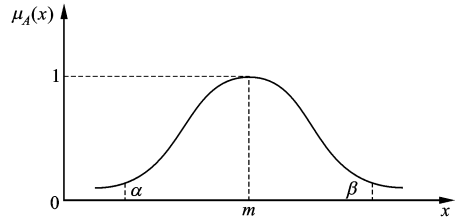


图 2 正态型隶属函数示意图

$$\begin{cases} 0 & x < m - \alpha \\ 1 - ((m-x)/\alpha) & m - \alpha \leq x \leq m \\ 1 - ((x-m)/\beta) & m < x \leq m + \beta \\ 0 & x > m + \beta \end{cases} \quad (2)$$

模糊数 $[(m-\alpha), m, (m+\beta)]$ 的 λ ($0 \leq \lambda \leq 1$) 截集 $A_\lambda = [(m-\alpha) + \alpha\lambda, (m+\beta) - \beta\lambda]$ 为一个区间数, 设 A, B 为三角型模糊数, 根据经典扩张原理^[7-8], 对于 $\forall \lambda \in [0, 1]$, 有以下的扩张运算式

$$A_\lambda + B_\lambda = [L_A^\lambda, R_A^\lambda] + [L_B^\lambda, R_B^\lambda] = [L_A^\lambda + L_B^\lambda, R_A^\lambda + R_B^\lambda] \quad (3)$$

$$A_\lambda - B_\lambda = [L_A^\lambda, R_A^\lambda] - [L_B^\lambda, R_B^\lambda] = [L_A^\lambda - L_B^\lambda, R_A^\lambda - R_B^\lambda] \quad (4)$$

$$A_\lambda B_\lambda = [L_A^\lambda, R_A^\lambda][L_B^\lambda, R_B^\lambda] = [L_A^\lambda L_B^\lambda, R_A^\lambda R_B^\lambda] \quad (5)$$

$$A_\lambda / B_\lambda = [L_A^\lambda, R_A^\lambda] / [L_B^\lambda, R_B^\lambda] = [L_A^\lambda / L_B^\lambda, R_A^\lambda / R_B^\lambda] \quad (6)$$

1.2.2 正态型隶属函数 正态型模糊数的隶属函数为

$$\mu_B(x) = \begin{cases} L(x) = e^{-((m-x)/\alpha)^2} & x < m, \alpha > 0 \\ 1 & x = m \\ R(x) = e^{-((x-m)/\beta)^2} & x > m, \beta < 0 \end{cases} \quad (7)$$

取 λ 截集后得到的正态型模糊数 B 的新隶属函数为

$$\mu_B(x) = \begin{cases} L(x) = e^{-((m-x)/\alpha)^2} & x \in [m - \alpha(-\ln \lambda)^{1/2}, m] \\ R(x) = e^{-((x-m)/\beta)^2} & x \in [m, m + \beta(-\ln \lambda)^{1/2}] \\ 1 & x = m \\ 0 & x < m - \alpha(-\ln \lambda)^{1/2} \text{ 或 } x > m + \beta(-\ln \lambda)^{1/2} \end{cases} \quad (8)$$

故 λ 截集区间为

$$B_\lambda = [m - \alpha(-\ln \lambda)^{1/2}, m + \beta(-\ln \lambda)^{1/2}]$$

1.3 故障树分析的模糊算子

在传统故障树分析中, 顶事件的失效概率是利

用逻辑门算子对基本事件发生的概率进行运算获得的,因此知道底事件的发生概率和结构函数就可以惟一确定系统顶事件的发生概率.在模糊故障树分析过程中,采用模糊数来描述底事件发生的概率,用模糊算子代替传统的逻辑门算子,从而得到顶事件发生的概率模糊数^[4,9].当用三角型模糊数表示底事件发生概率时,根据三角型模糊数截集表示方法,底事件发生概率的截集为

$$F_{1\lambda} = [(m_1 - \alpha_1) + \alpha_1\lambda, (m_1 + \beta_1) - \beta_1\lambda]$$
$$F_{2\lambda} = [(m_2 - \alpha_2) + \alpha_2\lambda, (m_2 + \beta_2) - \beta_2\lambda]$$
$$F_{n\lambda} = [(m_n - \alpha_n) + \alpha_n\lambda, (m_n + \beta_n) - \beta_n\lambda]$$

则故障树的与门结构和或门结构的模糊算子如下.

与门结构

$$F_{s\lambda}^{\text{and}} = \prod_{i=1}^n F_{i\lambda} = F_{1\lambda}F_{2\lambda}\cdots F_{n\lambda} =$$
$$((m_1 - \alpha_1) + \alpha_1\lambda, (m_1 + \beta_1) - \beta_1\lambda)((m_2 - \alpha_2) +$$
$$\alpha_2\lambda, (m_2 + \beta_2) - \beta_2\lambda), \cdots,$$
$$((m_n - \alpha_n) + \alpha_n\lambda, (m_n + \beta_n) - \beta_n\lambda) =$$
$$\left[\prod_{i=1}^n ((m_i - \alpha_i) + \alpha_i\lambda), \prod_{i=1}^n ((m_i + \beta_i) - \beta_i\lambda) \right]$$

(9)

或门结构

$$F_{s\lambda}^{\text{or}} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - F_{i\lambda}) = [1, 1] - \prod_{i=1}^n ([1, 1] -$$
$$((m_i - \alpha_i) + \alpha_i\lambda, (m_i + \beta_i) + \beta_i\lambda)) =$$
$$\left[1 - \prod_{i=1}^n (1 - (m_i - \alpha_i) - \alpha_i\lambda), 1 - \right.$$
$$\left. \prod_{i=1}^n (1 - (m_i + \beta_i) + \beta_i\lambda) \right]$$

(10)

当用正态型模糊数表示底事件发生概率时,故障树的与门结构和或门结构的模糊算子如下.

与门结构

$$F_{s\lambda}^{\text{and}} = \prod_{i=1}^n F_{i\lambda} = F_{1\lambda}F_{2\lambda}F_{3\lambda}\cdots F_{n\lambda} =$$
$$\left[\prod_{i=1}^n (m_i - \alpha_i(-\ln\lambda)^{1/2}), \prod_{i=1}^n (m_i + \beta_i(-\ln\lambda)^{1/2}) \right]$$

(11)

或门结构

$$F_{s\lambda}^{\text{or}} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - F_{i\lambda}) =$$
$$\left[1 - \prod_{i=1}^n (1 - (m_i - \alpha_i(-\ln\lambda)^{1/2})), \right.$$
$$\left. 1 - \prod_{i=1}^n (1 - (m_i + \beta_i(-\ln\lambda)^{1/2})) \right]$$

(12)

2 驱动桥系统的模糊故障树分析

2.1 驱动桥系统的结构及工作原理

驱动桥位于汽车传动系统的末端,如图 3 所示^[10].其功能是:①将万向传动装置传来的发动机转矩通过主减速器、差速器、半轴等传到驱动车轮,起到降低转速、增大转矩的作用;②通过主减速器的圆锥齿轮副来改变转矩的传递方向;③通过差速器实现两侧车轮的差速,从而保证内、外侧车轮以不同的转速转动,并实现汽车转向.

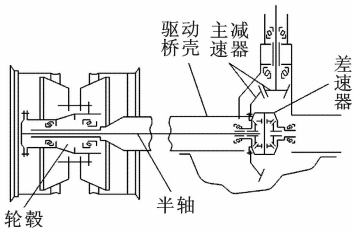


图 3 非断开式驱动桥示意图

2.2 驱动桥系统故障树的建立

对于汽车驱动桥,选择驱动桥异响为顶事件,中间事件为主减速器和差速器总成的异响.若这 2 个中间事件中的任意一个事件发生,顶事件就会发生(见表 1),所建立的故障树如图 4 所示.

表 1 事件编码

事件代号	事件名称	事件代号	事件名称
T	驱动桥异响	x_{11}	轴承疲劳点蚀
M_1	主减速器总成异响	x_{12}	轴承磨损过大
M_2	主动锥齿轮轴承异响	x_{13}	轴承调整过松
M_3	差速器总成异响	x_{14}	轴承座不同心
x_1	齿轮轮齿折断	x_{15}	差速器壳螺栓松动
x_2	齿侧间隙不均	x_{16}	差速器齿轮装配过紧
x_3	齿轮磨损严重、齿面接触错位	x_{17}	行星齿轮、十字轴和半轴齿轮磨损过大
x_4	齿轮轴承预紧度不足	x_{18}	半轴弯曲
x_5	主动锥齿轮的固定螺帽松动	x_{19}	行星齿轮与半轴齿轮间隙不均
x_6	齿轮啮合不良	x_{20}	差速器轴承磨损过大
x_7	润滑油不足	x_{21}	半轴齿轮及键槽磨损过大
x_8	从动锥齿轮松动	x_{22}	半轴齿轮与半轴花键配合松动
x_9	主动齿轮油封损坏		
x_{10}	轴承预紧度过大		

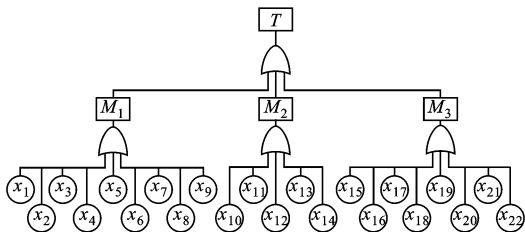


图 4 汽车驱动桥系统故障树

2.3 故障树的定性分析

故障树定性分析的主要任务在于找出影响系统出现某种故障的关键事件,也就是定性地分析出系统顶事件故障发生的若干种可能性,同时也为故障树定量分析(顶事件发生概率、底事件的重要度)打下基础.在故障树中,割集是能使顶事件发生的一些底事件的集合,如割集中的任一底事件不发生,顶事件也就不发生,这样的割集称之为最小割集^[11].求最小割集最常用的 2 种方法是上行法和下行法,本文用上行法来求故障树的最小割集.

上行法算法自下而上进行,把最底一层的逻辑门用其输入事件来表示,与门是事件的交,或门是事件的并,而上一级的逻辑门再由其输入表示,一步步往上推,一直把顶事件表示出来,其中在做每一步时均利用集合运算规则进行简化^[3].

由本文所建的故障树,根据与门用乘、或门用加的原则,有

$$T = M_1 + M_2 + M_3 \tag{13}$$

$$M_1 = x_1 + x_2 + x_3 + \cdots + x_9 \tag{14}$$

$$M_2 = x_{10} + x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{14} \tag{15}$$

$$M_3 = x_{15} + x_{16} + \cdots + x_{22} \tag{16}$$

故得

$$T = x_1 + x_2 + x_3 + \cdots + x_{19} + x_{20} + x_{21} + x_{22} \tag{17}$$

所以该汽车驱动桥系统的最小割集为

$$\{x_1\}, \{x_2\}, \{x_3\}, \cdots, \{x_{20}\}, \{x_{21}\}, \{x_{22}\}$$

2.4 故障树的定量分析

为了分析简便,仅取中间事件 M_2 来分析.根据资料^[12],假定总体失效概率为 10%.另据统计^[13],轴承失效中的 16%为装配不当,36%为润滑不良,14%为污染,34%为疲劳失效.设 M_2 中底事件的发生概率如表 2 所示,根据上文中关于底事件发生概率的截集区间表示方法,则有

$$F_{10\lambda} = ((0.016 - 0.005) + 0.005\lambda, (0.016 + 0.005) - 0.005\lambda) \tag{18}$$

$$F_{11\lambda} = ((0.034 - 0.01) + 0.01\lambda, (0.034 + 0.01) - 0.01\lambda) \tag{19}$$

$$F_{12\lambda} = ((0.036 - 0.01) + 0.01\lambda, (0.036 + 0.01) - 0.01\lambda) \tag{20}$$

$$F_{13\lambda} = ((0.016 - 0.005) + 0.005\lambda, (0.016 + 0.005) - 0.005\lambda) \tag{21}$$

$$F_{14\lambda} = ((0.016 - 0.005) + 0.005\lambda, (0.016 + 0.005) - 0.005\lambda) \tag{22}$$

表 2 事件 M_2 的基本数值

事件代号	事件名称	m	α	β
x_{10}	轴承预紧度过大	0.016	0.005	0.005
x_{11}	轴承疲劳点蚀	0.034	0.010	0.010
x_{12}	轴承磨损	0.036	0.010	0.010
x_{13}	轴承调整过松	0.016	0.005	0.005
x_{14}	轴承座不同心	0.016	0.005	0.005

由于 $M_2 = x_{10} + x_{11} + x_{12} + x_{13} + x_{14}$,结合式(10)和式(18)~式(22),保留 4 位有效数字,则发生概率的截集区间为

$$F_{M_2\lambda} = [0.076\ 6 + 0.032\ 5\lambda, 0.122\ 6 - 0.013\ 5\lambda] \tag{23}$$

当 $\lambda=1$ 时,相当于底事件的发生概率为确定值, $F_{M_2^1}=0.109\ 1$.当 $\lambda=0$ 时,底事件的发生概率为一模糊数, $F_{M_2^0}$ 的值为一个区间 $[0.076\ 6, 0.122\ 6]$,即 $F_{M_2^0}$ 最小为 0.076 6,最大为 0.122 6.

同理,当用正态型隶属函数表示时,根据表 2 的数值,结合式(10)和式(12), $F_{M_2\lambda}$ 的表达式为

$$F_{M_2\lambda} = [0.054\ 3 + 0.058\ 5\lambda, 0.165\ 2 - 0.052\ 4\lambda] \tag{24}$$

$F_{M_2\lambda}$ 的值为一个区间,当 $\lambda=0$ 时,其值为 $[0.054\ 3, 0.165\ 2]$,即 M_2^0 最小为 0.054 3,最大为 0.165 2.

3 底事件的模糊概率重要度

从可靠性的角度来看,零部件在系统中的重要性不仅依赖于其结构,还依赖于本身的可靠度.底事件的模糊概率重要度^[3]为

$$I_h(j) = \frac{\partial h(p)}{\partial p_j} \quad j = 1, 2, \cdots, n \tag{25}$$

式中: $h(p)=h(p_1, p_2, \cdots, p_n)$ 为顶事件模糊故障函数; p_j 为第 j 个底事件 x_j 发生的模糊概率.本文为了分析方便,仅以三角型模糊数所描述的底事件发生概率为对象,来分析底事件的模糊概率重要度.由

于所建故障树全部由或门组成,因此

$$\begin{aligned} \partial h(p) &= 1 - \prod_{i=1}^n (1 - F_i) = [1, 1] - \prod_{i=1}^n ([1, 1] - \\ &((m_i - \alpha_i) + \alpha_i \lambda, (m_i + \beta_i) + \beta_i \lambda)) = \\ &\left(1 - \prod_{i=1}^n (1 - (m_i - \alpha_i) - \alpha_i \lambda), 1 - \right. \\ &\left. \prod_{i=1}^n (1 - (m_i + \beta_i) + \beta_i \lambda)\right) \end{aligned} \quad (26)$$

$$\partial p_j = ((m_j - \alpha_j) + \alpha_j \lambda, (m_j + \beta_j) - \beta_j \lambda) \quad (27)$$

$$\begin{aligned} I_h(j) &= \frac{\partial h(p)}{\partial p_j} = \frac{\partial \left(1 - \prod_{i=1}^{28} (1 - p_i)\right)}{\partial p_j} = \\ &\prod_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{27} (1 - p_i) = \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{28} ((1 - (m_i - \alpha_i) - \alpha_i \lambda), \\ &(1 - (m_i + \beta_i) + \beta_i \lambda)) \end{aligned} \quad (28)$$

为了分析方便,仅取 M_2 的底事件 $x_9 \sim x_{13}$ 作为分析对象来计算底事件的重要度,系统整个底事件重要度的计算方法类似. 根据式(27)、(28)、(29)及表2,取 λ 为0,则有: $I_h(10) = [0.874\ 1, 0.929\ 8]$; $I_h(11) = [0.895\ 2, 0.942\ 2]$; $I_h(12) = [0.897\ 0, 0.944\ 1]$; $I_h(13) = [0.874\ 1, 0.929\ 8]$; $I_h(14) = [0.874\ 1, 0.929\ 8]$. 因此, M_2 底事件模糊概率重要度的排序为

$$I_h(12) > I_h(11) > (I_h(10) = I_h(13) = I_h(14))$$

4 结 论

本文对汽车驱动桥系统进行了可靠性分析,简要地介绍了模糊故障树分析方法的基本理论以及汽车驱动桥系统的基本结构,建立了汽车驱动桥系统的故障树,对汽车驱动桥系统进行了定性定量分析. 分别应用三角型和正态型隶属函数对汽车驱动桥系统的可靠性进行了分析,计算得出了2种方法差别不大的结果. 最后,对驱动桥系统进行模糊概率重要度分析,取事件 M_2 为实例进行了计算. 从计算结果中可以看出,轴承磨损失效是中间事件 M_2 的关键事件. 在故障检测中,按照概率重要度的大小进行检

测,可以有效地提高系统故障的检测效率.

参考文献:

- [1] 梅启智, 廖炯生. 系统可靠性工程基础 [M]. 北京: 科学出版社, 1987: 166-195.
- [2] TANAKA H, FAN L T, LAI F S, et al. Fault-tree analysis by fuzzy probability[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1983, 32(5): 453-457.
- [3] 曹晋华, 程侃. 可靠性数学引论 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 131-164.
- [4] SINGER D. A fuzzy set approach to fault tree and reliability analysis [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1990, 34(22): 145-155.
- [5] HUANG H Z, TONG X, ZUO M J. Posbist fault tree analysis of coherent systems [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2004, 84(2): 141-148.
- [6] 黄洪钟. 机械系统故障树分析的一种新的模糊方法 [J]. 机械科学与技术, 1994, 49(1): 1-7.
- [7] HUANG Hongzhong. A new fuzzy set approach to mechanical system fault tree analysis [J]. Mechanical Science and Technology, 1994, 49(1): 1-7.
- [8] DUBOIS D, PRADE H. fuzzy sets and systems: theory and application [M]. New York, USA: Academic Press, 1980: 70-74.
- [9] 杨伦标, 高英仪. 模糊数学原理及应用 [M]. 广州: 华南理工大学出版社, 1996: 28-30.
- [10] 赵艳萍, 贡文伟. 模糊故障树分析及其应用研究 [J]. 中国安全科学学报, 2001, 12(6): 81-87.
- [11] ZHAO Yanping, GONG Wenwei. Fuzzy fault tree analysis and its application [J]. China Safety Science Journal, 2001, 12(6): 81-87.
- [12] 陈家瑞. 汽车构造 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006: 117-156.
- [13] 何德芳, 李力, 和济. 失效分析与故障预防 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1990: 194-220.
- [14] 车辆例保必不可少[EB/OL]. [2008-09-01]. <http://business.sohu.com/auto/detail/no0004.html>.
- [15] 轴承失效原因和解决方法[EB/OL]. [2008-09-01]. <http://www.sjlbearing.com/gongsi-xinwen/jishu-ziliao/0804-48.html>.

(编辑 管咏梅)