

文章编号:0254-0096(2018)12-3584-10

# 风电机组液压系统动态故障树的可靠性建模与评估

李 垚, 朱才朝, 宋朝省, 谭建军

(重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆 400044)

**摘 要:** 采用模糊数来表征基本事件的失效率参数,引入扩张原理和Laplace-Stieltjes变换方法求解风电机组液压系统状态转移方程组,得到模糊失效率对应的隶属度和模糊动态可靠度,对风电机组液压系统进行可靠性评估。对不同厂家液压产品进行可靠性评估,研究液压元件失效率参数对液压系统可靠性的影响,指出液压元件可靠度匹配对提高液压系统可靠性具有重要作用。通过对液压系统的可靠性建模和分析验证该方法在解决具有动态失效特征和失效概率具有不确定性问题的可行性。

**关键词:** 风电机组; 液压模型; 故障树分析; 可靠性分析; 马尔科夫链; 模糊集

**中图分类号:** TB114; TH112      **文献标识码:** A

## 0 引 言

随着风电机组装机数量的不断增多,加之风电机组工作环境恶劣和结构的日趋复杂,风电机组的设计、制造和运行维护成本急剧攀升,业主对其可靠性提出了越来越高的要求。液压系统作为风电机组的重要组成部分,对风电机组偏航制动、变桨制动和传动链制动等起着重要作用。由于工作环境复杂和运行工况多变等原因,实际风力机的液压系统失效时有发生,如高速轴制动器主动钳刹车片卡滞造成刹车片不能复位或抱死、高速轴制动器刹车片飞出、刹车片磨损等,因此有必要对风电机组液压系统进行可靠性分析。

液压系统内部采用冗余设计来提高其工作性能,零部件间的失效具有相关性和动态性,且失效率具有不确定性,液压系统的这些特点使得人们难以使用传统可靠性建模方法对其可靠性进行评估。基于马尔科夫链模型的动态故障树不仅具有传统故障树分析方法的功能,还能对具有动态失效特性的问题进行可靠性建模和评估。朱正福等<sup>[1]</sup>研究了将动态故障树模型转化为马尔科夫链模型,提出并证明了基于马尔科夫链模型的动态故障树分析方法的可靠性量化表征。Amari等<sup>[2]</sup>提出了一

种求解动态故障树模型的新方法,可提高计算速度和精度。文献[3]应用模糊动态故障树建立了数控加工中心液压系统可靠性模型,对系统可靠性进行了评估。文献[4,5]提出用连续时间马尔科夫模型对具有离散模糊状态系统进行可靠性建模和评估。王家序等<sup>[6]</sup>介绍了一种不完全共因失效系统动态故障树分析方法,指出现有基于动态故障树的马尔科夫链方法的不足。

本文将动态故障树分析方法中引入模糊理论,用三角模糊数表征各状态失效率的隶属度,采用马尔科夫链模型和模糊数得到模糊状态概率、模糊失效率对应的隶属度和动态可靠度曲线,实现对风电机组液压系统的可靠性建模和评估,研究模糊失效率参数对系统可靠性和模糊状态概率的影响。

## 1 基于马尔科夫链的模糊动态故障树模型

### 1.1 模糊集和模糊数

模糊理论用到模糊集合的基本概念和连续隶属度函数理论,它是在1965年从Zadeh<sup>[7,8]</sup>所提出的模糊集合理论的数学基础上发展起来的。在复杂装备可靠性评估中存在模糊不确定性和随机不确定性2种不确定性,模糊理论对处理模糊不确定

收稿日期: 2016-08-25

基金项目: 重庆市重点产业共性关键技术创新专项(cstc2015zdcy-ztx70012; cstc2015zdcy-ztx70010); 重庆市研究生科研创新项目(CYB16024)

通信作者: 朱才朝(1967—),男,博士、教授、博士生导师,主要从事机械装备振动与控制及可靠性方面的研究。cczhu@cqu.edu.cn

性问题非常有效。

在论域  $U$  上的模糊数  $F$ ，其隶属度函数  $\mu$  在  $[0, 1]$  内取值，它可被看成是元素为数对的集合，表示为  $F = \mu(y)/y$ ，其中  $y$  表示类元素， $\mu(y)$  是对应  $y$  的隶属度，则该映射为  $\mu_{\tilde{F}}: U \rightarrow [0, 1], u \mapsto \mu_{\tilde{F}}(u)$ ，对应模糊集为：

$$\tilde{F} = \begin{cases} \sum_{i=1}^n \frac{\mu(y_i)}{y_i}, & \text{定义域 } U \text{ 为离散的} \\ \int_U \frac{\mu(y)}{y}, & \text{定义域 } U \text{ 为连续的} \end{cases} \quad (1)$$

常见的模糊数有三角模糊数、正态模糊数、梯形模糊数和高斯模糊数等。三角模糊数是模糊理论中经常用到的隶属度函数。图 1 为典型的三角模糊数隶属度函数。

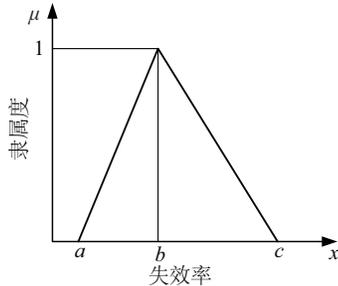


图 1 三角模糊数的隶属度函数

Fig. 1 Membership function of the triangular fuzzy number

三角模糊数  $f(x; a, b, c)$  由其隶属函数定义为：

$$f(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases} \quad (2)$$

### 1.2 扩张原理

扩张原理定义了模糊数之间的模糊运算法则，实现了模糊数间的模糊变换。假定  $\tilde{X}_i (i=1, 2, \dots, n)$  是论域  $P$  中的模糊数， $\tilde{X}_i$  对应的变量  $x_i \in P (i=1, 2, \dots, n)$ ， $y$  是实域  $P$  中的对应变量。根据扩张原理，将映射： $\tilde{X}_i \rightarrow f(x_1, x_2, \dots, x_n)$  扩张成一个新的映射： $\tilde{Y}_i \rightarrow u_{\tilde{Y}_i}(y)$ ，其隶属函数为：

$$\tilde{u}_{\tilde{Y}_i}(y) = \sup \min(u_{\tilde{X}_1}(x_1), u_{\tilde{X}_2}(x_2), \dots, u_{\tilde{X}_n}(x_n)) \quad (3)$$

式中， $x_i \in P, y = f(x_1, x_2, \dots, x_n), i = 1, 2, \dots, n$ 。

对应模糊数  $\tilde{Y}$  在水平截集  $\alpha$  下的取值区间为：

$$\tilde{Y}_\alpha(y) = \left[ \min_{1 \leq i \leq n} f(x; \mu_{\tilde{X}_i}(x_i) \geq \alpha), \max_{1 \leq i \leq n} f(x; \mu_{\tilde{X}_i}(x_i) \geq \alpha) \right] \quad (4)$$

求解模糊数取值区间就转化为求解一系列最优化问题，表达式为：

$$\begin{array}{ll} \text{目标函数} & \text{约束条件} \\ \tilde{Y}_a^L = \min f(x_1, x_2, \dots, x_n) & \tilde{x}_{1a}^L \leq x_1 \leq \tilde{x}_{1a}^U \\ \text{或: } \tilde{Y}_a^U = \max f(x_1, x_2, \dots, x_n) & \tilde{x}_{2a}^L \leq x_2 \leq \tilde{x}_{2a}^U \\ & \vdots \\ & \tilde{x}_{na}^L \leq x_n \leq \tilde{x}_{na}^U \end{array} \quad (5)$$

### 1.3 马尔科夫链模型

静态故障树既不能考虑装备失效率的不确定性，也不能考虑装备从正常状态到完全失效状态之间的退化状态。相较于静态故障树，模糊动态故障树具有非常大的优势。模糊动态故障树将马尔科夫链模型和模糊理论结合在一起，对具有动态失效特性和模糊失效率的复杂装备进行可靠性建模和评估。

#### 1) 动态逻辑门

表 1 列举了 4 种不同的动态逻辑门及其输入信息、失效判据和符号表示。

表 1 动态逻辑门和失效判据

Table 1 Dynamic gates and failure criteria

动态门	功能描述	失效判据	符号表示
优先与门	所有输入事件需按序发生	当输入事件从左到右依次发生时，输出事件发生	
顺序相关门	无输出事件	所有基本事件只能按给定顺序依次发生	
功能相关门	输入事件为相关事件和触发事件，无输出事件	触发事件发生时即引发相关事件的发生	
备件门	备件门包括冷备件门、温备件门和热备件门；	当优先输入事件发生时，备件依次进入工作状态	

#### 2) 模糊动态故障树

假定系统具有  $n$  个状态 ( $S_1, S_2, \dots, S_n$ )，建立马尔科夫模型对这  $n$  个状态进行转化，图 2 是不可修复系统的模糊状态转移图。用模糊失效概率表示状态之间的转移率，得到系统的模糊状态转移率

矩阵:

$$\tilde{S} = (\tilde{P}_{i,j}) = \begin{matrix} \text{状态1} & 2 \cdots n \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ \vdots \\ n \end{matrix} \begin{pmatrix} \tilde{p}_{1,1} & \tilde{p}_{1,2} & \cdots & \tilde{p}_{1,n} \\ \tilde{p}_{2,1} & \tilde{p}_{2,2} & \cdots & \tilde{p}_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \tilde{p}_{n,1} & \tilde{p}_{n,2} & \cdots & \tilde{p}_{n,n} \end{pmatrix} \end{matrix} \quad (6)$$

式中,  $\tilde{P}_{i,j}$  —— 系统从状态  $i$  转移到状态  $j$  的转移率。

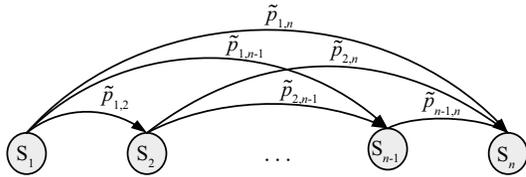


图2 系统模糊状态转移图

Fig. 2 Fuzzy state transition diagram of the system

将模糊转移率带入马尔科夫模型中得到对应状态的微分方程<sup>[9]</sup>:

$$\begin{cases} \frac{df_1(t)}{dt} = -\tilde{f}_1(t) \sum_{j=2}^n \tilde{p}_{1,j} \\ \frac{df_i(t)}{dt} = \sum_{j=i-1}^{i-1} \tilde{f}_j(t) \tilde{p}_{j,i} - \sum_{j=i+1}^n \tilde{f}_i(t) \tilde{p}_{i,j}, 1 < i < n, t \geq 0 \\ \frac{df_n(t)}{dt} = \sum_{j=1}^{n-1} \tilde{f}_j(t) \tilde{p}_{j,n} \end{cases} \quad (7)$$

式中,  $\tilde{f}$  —— 系统状态关于时间  $t$  的概率分布。

为简化计算, 基于初始条件  $\tilde{p}_1(0)=1, \tilde{p}_i(0)=0(i \neq 1)$  将上述微分方程进行拉普拉斯变换, 得到关于复数  $s$  的线性方程:

$$\begin{cases} s\tilde{f}_1(s) - 1 = -\tilde{f}_1(s) \sum_{i=2}^n \tilde{p}_{1,i} \\ s\tilde{f}_i(s) = \sum_{j=1}^{i-1} \tilde{f}_j(s) \tilde{p}_{j,i} - \sum_{j=i+1}^n \tilde{f}_i(s) \tilde{p}_{i,j}, 1 < i < n \\ s\tilde{f}_n(s) = \sum_{j=1}^{n-1} \tilde{p}_{j,n} \tilde{f}_j(s) \end{cases} \quad (8)$$

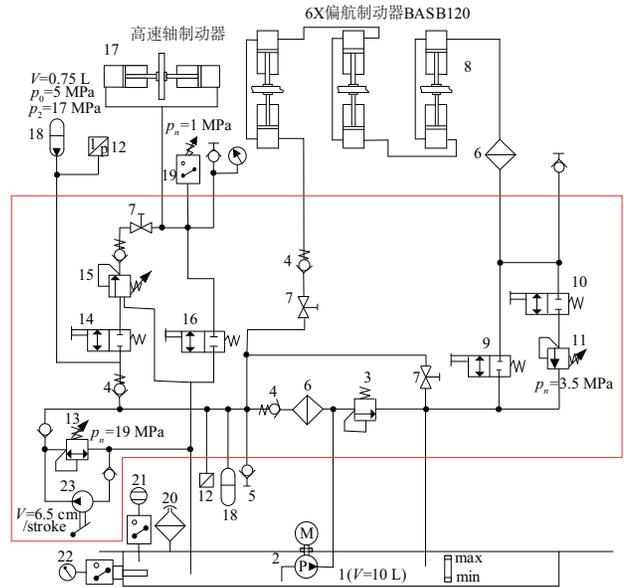
于是, 求解式(8)得到各状态关于  $s$  的函数  $\tilde{f}_i(s)$ , 然后对函数  $\tilde{f}_i(s)$  做拉普拉斯反变换得到系统各状态关于时间  $t$  的失效概率分布函数  $\tilde{f}_i(t)$ , 根据扩张原理, 结合式(5)即可计算出  $\tilde{f}_i(t)$  的取值区间。

## 2 风电机组液压系统可靠性模型

### 2.1 液压系统工作原理

风电机组液压系统为制动系统提供动力源, 主要完成风电机组的启停任务, 它由 2 个压力保持回

路构成: 1) 通过蓄能器供给偏航制动系统; 2) 通过蓄能器供给高速轴刹车系统。这 2 个回路的功能是使液压系统始终保持一定的压力。为使液压系统结构紧凑和安装、维护、检修方便, 风电机组中将这 2 个回路集成到同一个液压站上。图 3 为风电机组液压系统原理图。蓄能器和压力传感器是液压系统中 2 个重要的辅助元件。由于系统压力常会出现泄漏, 蓄能器常用来实现保压功能, 当蓄能器 18 压力低于压力传感器 12 设定压力时, 液压泵开始为系统补压; 当压力传感器 12 压力达到设定压力时, 液压泵停止工作, 保证蓄能器 18 始终保持在设定压力。故蓄能器和压力传感器在液压系统中具有重要作用。



1. 油箱 2. 液压泵 3. 主溢流阀 4, 5. 单向阀
6. 过滤器 7. 截止阀 8. 偏航制动器液压缸
- 9, 10, 14, 16. 两位两通电磁换向阀 11. 偏航溢流阀
12. 显示器 13, 15. 溢流阀 17. 高速轴制动液压缸
18. 蓄能器 19. 压力继电器 20. 空气滤清器
21. 液位计 22. 温度计

图3 2.0 MW 风电机组液压系统原理图

Fig. 3 Schematic of hydraulic system for 2.0 MW wind turbines

图 4 是液压系统压力控制流程图。

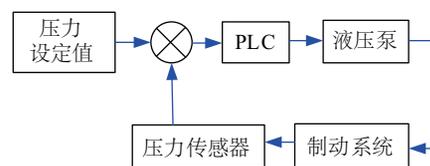


图4 液压系统压力控制流程图

Fig. 4 Flowchart of pressure control for hydraulic system

在偏航回路中,根据风电机组的控制策略,风力机在迎风时要求完全制动,以保证风力机始终处于迎风状态;当风向变化需要对风时,为防止振动和保证精度,电机驱动偏航时仍需要液压系统提供制动力,此时为半制动状态;当电缆旋转一定圈数后,机舱需要反转来“解缆”,此时偏航制动器完全松开。故液压系统需要为偏航制动器提供3种压力状态<sup>[10]</sup>。溢流阀3设定系统压力,溢流阀11设定偏航对风压力,当叶轮迎风时,电磁换向阀9、10失电,偏航制动器以3设定压力制动;当发出偏航指令时,9失电,10得电,制动器以11设定压力制动;当收到“解缆”指令后,9、10均得电,偏航制动器完全释放。

在高速轴制动回路中,风电机组故障需要维修或遇到极端天气时,为保证传动链处于静止状态需要开启高速轴制动器,它是通过主被动钳夹紧刹车片实现制动。当风电机组被迫停机时,换向阀14得电,16失电,液压油进入17无杆腔,实现制动;当要求启动时,16得电,17中油液回流到油箱1,制动解除。

2.2 液压系统动态故障树

根据风电机组液压系统工作原理、实际失效模式和失效机理,引入动态逻辑门,建立如图5所示的动态故障树模型。故障树事件说明:选取“液压系统回路压力不足”为顶事件T;E<sub>1</sub>为高速轴制动回路故障;E<sub>2</sub>为偏航制动回路故障;E<sub>3</sub>为主干路故障;E<sub>31</sub>为油路故障;E<sub>32</sub>为供油故障;X<sub>2</sub>为液压泵故障;X<sub>3</sub>为主溢流阀故障;X<sub>4</sub>为单向阀故障;X<sub>6</sub>为过滤器故障;X<sub>7</sub>为截止阀故障;X<sub>8</sub>为偏航制动器液压缸故障;X<sub>9</sub>、X<sub>10</sub>、X<sub>14</sub>、X<sub>16</sub>为两位两通电磁换向阀故障;X<sub>11</sub>为偏航溢流阀故障;X<sub>5</sub>为溢流阀故障;X<sub>17</sub>为高速轴制动液压缸故障;X<sub>18</sub>为蓄能器故障;X<sub>19</sub>

为压力继电器故障。

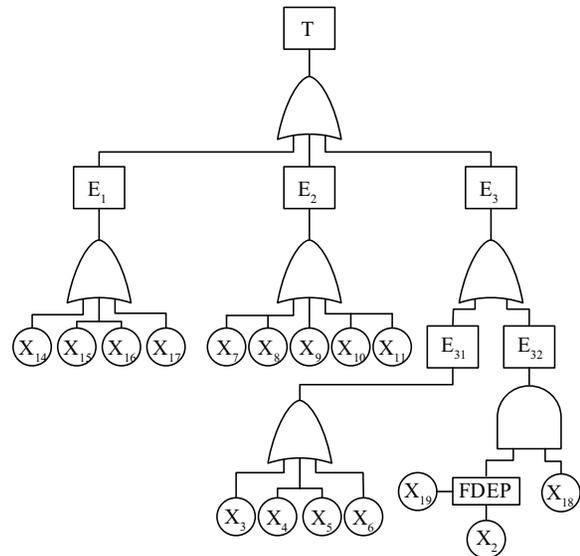


图5 2.0 MW 风电机组液压系统动态故障树  
Fig. 5 Dynamic fault tree of hydraulic system for 2.0 MW wind turbines

2.3 液压系统模糊马尔科夫模型

结合基本事件模糊失效率,将图5所示的动态故障树模型转化为模糊马尔科夫模型,如图6所示。图6中S<sub>1</sub>为液压系统完好状态;S<sub>2</sub>为液压泵故障导致供油故障状态;S<sub>3</sub>为压力继电器故障导致供油故障状态;S<sub>4</sub>为蓄能器故障导致供油故障状态;S<sub>5</sub>为液压系统完全失效状态。

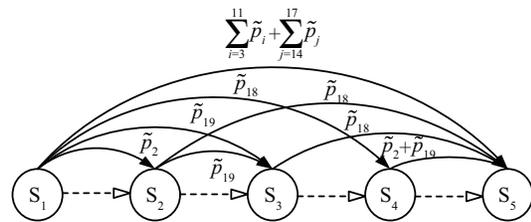


图6 风电机组液压系统回路状态转移图  
Fig. 6 State transition diagram of the circuit of hydraulic system of wind turbines

$$\text{状态转移矩阵为: } \tilde{P} = \begin{bmatrix} -\sum_{i=2}^{11} \tilde{p}_i - \sum_{j=14}^{17} \tilde{p}_j & \tilde{p}_2 & \tilde{p}_{19} & \tilde{p}_{18} & \sum_{i=3}^{11} \tilde{p}_i + \sum_{j=14}^{17} \tilde{p}_j \\ 0 & -\tilde{p}_{18} - \tilde{p}_{19} & \tilde{p}_{19} & 0 & \tilde{p}_{18} \\ 0 & 0 & -\tilde{p}_{18} & 0 & \tilde{p}_{18} \\ 0 & 0 & 0 & -\tilde{p}_2 - \tilde{p}_{19} & \tilde{p}_2 + \tilde{p}_{19} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

由模糊转移率构成的马尔科夫模型对应的微分方程组为:

$$\begin{cases} \frac{d\tilde{f}_1(t)}{dt} = -\tilde{f}_1(t)(\sum_{i=2}^{11}\tilde{p}_i + \sum_{j=14}^{19}\tilde{p}_j) \\ \frac{d\tilde{f}_2(t)}{dt} = \tilde{f}_1(t)\tilde{p}_2 - \tilde{f}_2(t)(\tilde{p}_{18} + \tilde{p}_{19}) \\ \frac{d\tilde{f}_3(t)}{dt} = \tilde{f}_1(t)\tilde{p}_{19} + \tilde{f}_2(t)\tilde{p}_{19} - \tilde{f}_3(t)\tilde{p}_{18} \\ \frac{d\tilde{f}_4(t)}{dt} = \tilde{f}_1(t)\tilde{p}_{18} - \tilde{f}_4(t)(\tilde{p}_2 + \tilde{p}_{19}) \\ \frac{d\tilde{f}_5(t)}{dt} = \tilde{f}_1(t)(\sum_{i=3}^{11}\tilde{p}_i + \sum_{j=14}^{17}\tilde{p}_j) + \tilde{f}_2(t)\tilde{p}_{18} + \tilde{f}_3(t)\tilde{p}_{18} + \tilde{f}_4(t)(\tilde{p}_2 + \tilde{p}_{19}) \end{cases} \quad (10)$$

已知初始条件  $\tilde{f}_1(0) = 1, \tilde{f}_i(0) = 0 (i \neq 1)$ , 对方程组(10)进行拉普拉斯变换, 得到线性方程组为:

$$\begin{cases} s\tilde{f}_1(s) - 1 = -\tilde{f}_1(s)(\sum_{i=2}^{11}\tilde{p}_i + \sum_{j=14}^{19}\tilde{p}_j) \\ s\tilde{f}_2(s) = \tilde{f}_1(s)\tilde{p}_2 - \tilde{f}_2(s)(\tilde{p}_{18} + \tilde{p}_{19}) \\ s\tilde{f}_3(s) = \tilde{f}_1(s)\tilde{p}_{19} + \tilde{f}_2(s)\tilde{p}_{19} - \tilde{f}_3(s)\tilde{p}_{18} \\ s\tilde{f}_4(s) = \tilde{f}_1(s)\tilde{p}_{18} - \tilde{f}_4(s)(\tilde{p}_2 + \tilde{p}_{19}) \\ s\tilde{f}_5(s) = \tilde{f}_1(s)(\sum_{i=3}^{11}\tilde{p}_i + \sum_{j=14}^{17}\tilde{p}_j) + \tilde{f}_2(s)\tilde{p}_{18} + \tilde{f}_3(s)\tilde{p}_{18} + \tilde{f}_4(s)(\tilde{p}_2 + \tilde{p}_{19}) \end{cases} \quad (11)$$

联立求解方程(11)得到系统各状态关于  $s$  的函数  $\tilde{f}_i(s)$ :

$$\tilde{f}_1(s) = 1 / (s + \sum_{i=2}^{11}\tilde{p}_i + \sum_{j=14}^{19}\tilde{p}_j) \quad (12)$$

$$\tilde{f}_2(s) = \tilde{p}_2 / ((s + \tilde{p}_{18} + \tilde{p}_{19})(s + \sum_{i=2}^{11}\tilde{p}_i + \sum_{j=14}^{19}\tilde{p}_j)) \quad (13)$$

$$\tilde{f}_3(s) = \tilde{p}_{19} / ((s + \tilde{p}_{18})(s + \sum_{i=2}^{11}\tilde{p}_i + \sum_{j=14}^{19}\tilde{p}_j)) + \tilde{p}_2 \cdot \tilde{p}_{19} / ((s + \tilde{p}_{18})(s + \tilde{p}_{18} + \tilde{p}_{19})(s + \sum_{i=2}^{11}\tilde{p}_i + \sum_{j=14}^{19}\tilde{p}_j)) \quad (14)$$

$$\tilde{f}_4(s) = \tilde{p}_{18} / ((s + \tilde{p}_2 + \tilde{p}_{19})(s + \sum_{i=2}^{11}\tilde{p}_i + \sum_{j=14}^{19}\tilde{p}_j)) \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \tilde{f}_5(s) = & \frac{\sum_{i=3}^{11}\tilde{p}_i + \sum_{j=14}^{17}\tilde{p}_j}{s(s + \sum_{i=2}^{11}\tilde{p}_i + \sum_{j=14}^{19}\tilde{p}_j)} + \frac{\tilde{p}_2\tilde{p}_{18}}{s(s + \tilde{p}_{18} + \tilde{p}_{19})(s + \sum_{i=2}^{11}\tilde{p}_i + \sum_{j=14}^{19}\tilde{p}_j)} + \\ & \frac{\tilde{p}_2\tilde{p}_{18}\tilde{p}_{19}}{s(s + \tilde{p}_{18})(s + \tilde{p}_{18} + \tilde{p}_{19})(s + \sum_{i=2}^{11}\tilde{p}_i + \sum_{j=14}^{19}\tilde{p}_j)} + \\ & \frac{(\tilde{p}_2 + \tilde{p}_{19})\tilde{p}_{18}}{s(s + \tilde{p}_2 + \tilde{p}_{19})(s + \sum_{i=2}^{11}\tilde{p}_i + \sum_{j=14}^{19}\tilde{p}_j)} + \frac{\tilde{p}_{18}\tilde{p}_{19}}{s(s + \tilde{p}_{18})(s + \sum_{i=2}^{11}\tilde{p}_i + \sum_{j=14}^{19}\tilde{p}_j)} \end{aligned} \quad (16)$$

### 3 液压系统模糊动态故障树可靠性分析

结合某公司 2.0 MW 风电机组液压系统故障维修记录数据, 得到液压系统基本事件的模糊失效率。考虑到风电机组工作环境复杂多变和失效率的不确定性等特征, 本文用三角模糊数表征基本事件失效率的模糊不确定性, 用马尔科夫链描述液压系统的模糊状态。基本事件分别用  $X_i (i = 2, 3, \dots, 19)$  表示, 对应的模糊失效率为  $\tilde{p}_i (i = 2, 3, \dots, 19)$ , 如表 2 所示。

表 2 三角模糊数表示基本事件的失效率数据

Table 2 Failure rates represented by triangular fuzzy number of basic events

基本事件	模糊失效率 $\tilde{p}_i \times 10^{-6}/h^{-1}$	基本事件	模糊失效率 $\tilde{p}_i \times 10^{-6}/h^{-1}$
$X_2$	[1.6143, 2.4214, 3.2286]	$X_{10}$	[4.8921, 5.7078, 6.5234]
$X_3$	[4.8450, 5.7000, 6.5550]	$X_{11}$	[4.845000, 5.70, 6.5550]
$X_4$	[1.6143, 3.1133, 4.6123]	$X_{14}$	[4.8921, 5.7077, 6.5234]
$X_5$	[0.0082, 0.0182, 0.0283]	$X_{15}$	[4.8450, 5.7000, 6.5550]
$X_6$	[0.5294, 0.6849, 0.8404]	$X_{16}$	[4.8921, 5.7077, 6.5234]
$X_7$	[0.0733, 0.2283, 0.3833]	$X_{17}$	[0.4612, 1.7296, 2.9982]
$X_8$	[0.0153, 0.1153, 0.2153]	$X_{18}$	[0.9281, 1.1531, 1.3781]
$X_9$	[4.8921, 5.7078, 6.5234]	$X_{19}$	[0.0425, 0.050, 0.0575]

对式(10)~式(14)作拉普拉斯反变换得液压系统处于各状态时失效概率关于时间  $t$  的函数为:

1) 系统处于模糊状态  $S_1$  时的失效概率函数:

$$\tilde{f}_1(t) = e^{-\left(\sum_{i=2}^{11}\tilde{p}_i + \sum_{j=14}^{19}\tilde{p}_j\right)t} \quad (17)$$

2) 系统处于模糊状态  $S_2$  时的失效概率函数:

$$\begin{aligned} \tilde{f}_2(t) = & \tilde{p}_2 / \left(\sum_{i=2}^{11}\tilde{p}_i + \sum_{j=14}^{19}\tilde{p}_j\right) \cdot e^{-\left(\tilde{p}_{18} + \tilde{p}_{19}\right)t} - \\ & \tilde{p}_2 / \left(\sum_{i=2}^{11}\tilde{p}_i + \sum_{j=14}^{17}\tilde{p}_j\right) \cdot e^{-\left(\sum_{i=2}^{11}\tilde{p}_i + \sum_{j=14}^{19}\tilde{p}_j\right)t} \end{aligned} \quad (18)$$

3) 系统处于模糊状态  $S_3$  时的失效概率函数:

$$\begin{aligned} \tilde{f}_3(t) = & \left( \frac{\tilde{p}_{19}}{\sum_{i=2}^{11} \tilde{p}_i + \sum_{j=14}^{17} \tilde{p}_j + \tilde{p}_{19}} + \frac{\tilde{p}_2}{\sum_{i=2}^{11} \tilde{p}_i + \sum_{j=14}^{19} \tilde{p}_j - \tilde{p}_{18}} \right) \cdot e^{-\tilde{p}_{18}t} + \\ & \frac{\tilde{p}_2 \tilde{p}_{19}}{\left( \sum_{i=2}^{11} \tilde{p}_i + \sum_{j=14}^{19} \tilde{p}_j - \tilde{p}_{18} \right) \left( \sum_{i=2}^{11} \tilde{p}_i + \sum_{j=14}^{17} \tilde{p}_j \right)} \cdot e^{-\left( \sum_{i=2}^{11} \tilde{p}_i + \sum_{j=14}^{19} \tilde{p}_j \right)t} - \\ & \tilde{p}_{19} / \left( \sum_{i=2}^{11} \tilde{p}_i + \sum_{j=14}^{19} \tilde{p}_j - \tilde{p}_{18} \right) \cdot e^{-\left( \sum_{i=2}^{11} \tilde{p}_i + \sum_{j=14}^{19} \tilde{p}_j \right)t} - \\ & \tilde{p}_2 / \left( \sum_{i=2}^{11} \tilde{p}_i + \sum_{j=14}^{17} \tilde{p}_j \right) \cdot e^{-\left( \tilde{p}_{18} + \tilde{p}_{19} \right)t} \end{aligned} \quad (19)$$

4) 系统处于模糊状态  $S_4$  时的失效概率函数:

$$\begin{aligned} \tilde{f}_4(t) = & \tilde{p}_{18} / \left( \sum_{i=3}^{11} \tilde{p}_i + \sum_{j=14}^{18} \tilde{p}_j \right) \cdot e^{-\left( \tilde{p}_2 + \tilde{p}_{19} \right)t} - \\ & \tilde{p}_{18} / \left( \sum_{i=3}^{11} \tilde{p}_i + \sum_{j=14}^{18} \tilde{p}_j \right) \cdot e^{-\left( \sum_{i=2}^{11} \tilde{p}_i + \sum_{j=14}^{19} \tilde{p}_j \right)t} \end{aligned} \quad (20)$$

5) 系统处于模糊状态  $S_5$  时的失效概率函数:

$$\begin{aligned} \tilde{f}_5(t) = & 1 - \frac{\tilde{p}_2 + \tilde{p}_{19}}{\sum_{i=2}^{11} \tilde{p}_i + \sum_{j=14}^{17} \tilde{p}_j + \tilde{p}_{19}} \cdot e^{-\tilde{p}_{18}t} - \frac{\tilde{p}_{18}}{\sum_{i=3}^{11} \tilde{p}_i + \sum_{j=14}^{18} \tilde{p}_j} \cdot e^{-\left( \tilde{p}_2 + \tilde{p}_{19} \right)t} + \\ & \left[ \frac{\sum_{i=3}^{11} \tilde{p}_i + \sum_{j=14}^{17} \tilde{p}_j}{\sum_{i=2}^{11} \tilde{p}_i + \sum_{j=14}^{19} \tilde{p}_j} + \frac{\tilde{p}_2 \tilde{p}_{18}}{\left( \sum_{i=2}^{11} \tilde{p}_i + \sum_{j=14}^{19} \tilde{p}_j \right) \left( \sum_{i=2}^{11} \tilde{p}_i + \sum_{j=14}^{17} \tilde{p}_j \right)} \right] + \\ & \frac{\tilde{p}_{18} \tilde{p}_{19}}{\left( \sum_{i=2}^{11} \tilde{p}_i + \sum_{j=14}^{19} \tilde{p}_j \right) \left( \sum_{i=2}^{11} \tilde{p}_i + \sum_{j=14}^{19} \tilde{p}_j - \tilde{p}_{18} \right)} - \\ & \frac{\tilde{p}_2 \tilde{p}_{18} \tilde{p}_{19}}{\left( \sum_{i=2}^{11} \tilde{p}_i + \sum_{j=14}^{19} \tilde{p}_j \right) \left( \sum_{i=2}^{11} \tilde{p}_i + \sum_{j=14}^{19} \tilde{p}_j - \tilde{p}_{18} \right) \left( \sum_{i=2}^{11} \tilde{p}_i + \sum_{j=14}^{17} \tilde{p}_j \right)} + \\ & \left. \frac{\left( \tilde{p}_2 + \tilde{p}_{19} \right) \tilde{p}_{18}}{\left( \sum_{i=2}^{11} \tilde{p}_i + \sum_{j=14}^{19} \tilde{p}_j \right) \left( \sum_{i=3}^{11} \tilde{p}_i + \sum_{j=14}^{18} \tilde{p}_j \right)} \right] \cdot e^{-\left( \sum_{i=2}^{11} \tilde{p}_i + \sum_{j=14}^{19} \tilde{p}_j \right)t} \end{aligned} \quad (21)$$

求解上述模糊失效概率函数式(17)~式(21), 可得到液压系统各模糊状态在不同时刻  $t$  时的模糊失效概率和对应动态可靠度曲线。依据模糊动态故障树理论对风电机组液压系统进行可靠性

分析。

图 7 为系统模糊状态  $S_5$  在  $t=117280$  h 时的模糊失效概率的隶属函数。从图 7 可看出, 在隶属度  $\alpha=0$  时失效概率分别取得最小值 0.4749 和最大值 0.5989, 在  $\alpha=1$  时失效概率对应值为 0.5369, 表示系统模糊状态  $S_5$  在此时刻下最可能的失效概率值。

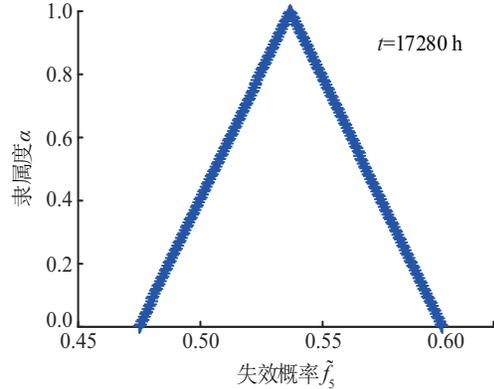


图 7 系统模糊状态  $\tilde{f}_5(t)$  的隶属函数  
Fig. 7 Membership of fuzzy state  $\tilde{f}_5(t)$

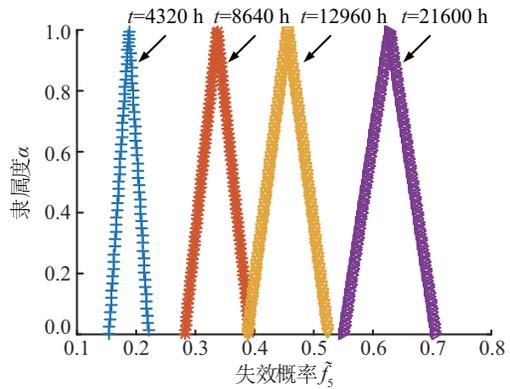


图 8 模糊状态  $\tilde{f}_5(t)$  的隶属函数随时间的变化  
Fig. 8 Membership of fuzzy state  $\tilde{f}_5(t)$  changing over time

图 9 表示风电机组液压系统各状态失效概率函数  $\tilde{f}_i(t)(i=1,2,\dots,5)$  在  $t=17280$  h (2 a) 时的隶属函数。从图 9 可看出, 液压系统状态  $S_1$  即完好状态时运行两年最可能发生失效的概率 0.4161, 并不是最小的。而在相同时间下状态  $S_2 \sim S_5$  发生失效的最可能的失效概率分别为 0.02848、0.0005846、0.01307、0.5511, 模糊状态  $S_3$  的概率值最小, 可视为不可能事件。  $S_2$  和  $S_4$  的失效概率值均小于 0.1, 远小于 0.5511, 所以风电机组液压系统在状态  $S_5$  失效的可能性最大。

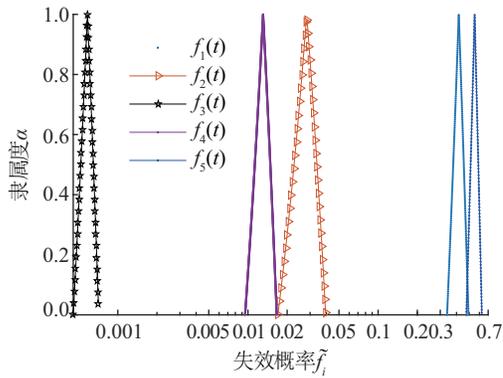
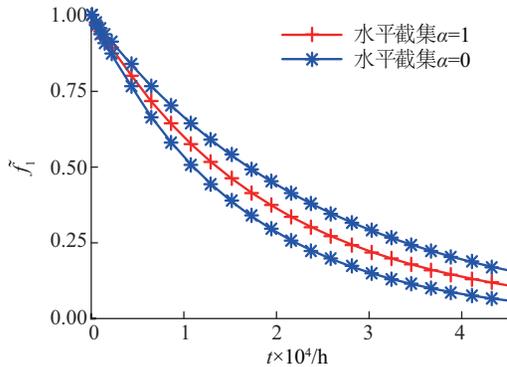
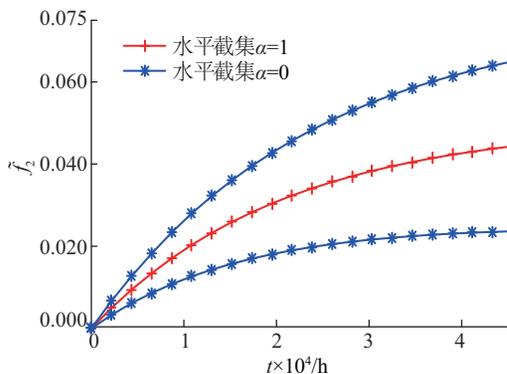


图9 隶属度函数  $\tilde{f}_i(t)$  在  $t=17280$  h 时的隶属度  
Fig. 9 Membership function of  $\tilde{f}_i(t)$  at  $t=17280$  h

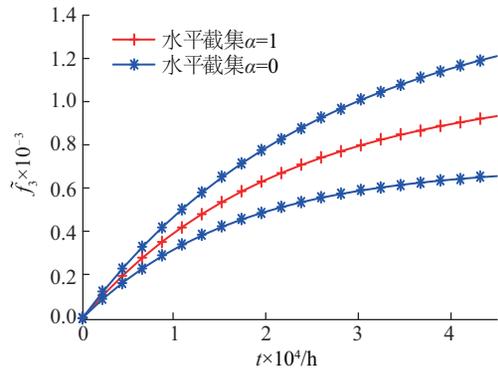
图 10 为系统模糊状态概率  $\tilde{f}_i(t)$  ( $i=1,2,\dots,5$ )。从图 10 可看出,模糊状态 1 概率走势和其他模糊状态相反,表明随着时间的推移,在初始状态发生失效的概率不断降低,且初始状态和最终状态失效率较其他模糊状态高很多,这符合“浴盆曲线”特征。模糊状态 3 概率小于 0.002,在一次随机过程中不可能发生,故为不可能事件。另外,在同一时刻下,模糊状态 5 概率最大,表明系统最有可能在状态 5 发生完全失效。同时,随着时间的推移,模糊状态概率不确定性呈现扩大的趋势。



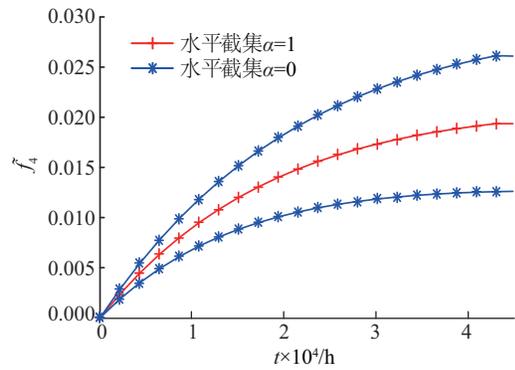
a.  $\tilde{f}_1(t)$



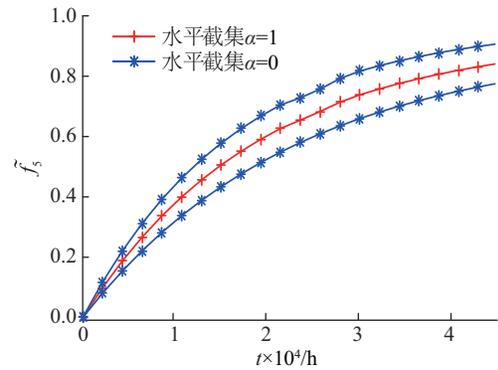
b.  $\tilde{f}_2(t)$



c.  $\tilde{f}_3(t)$



d.  $\tilde{f}_4(t)$



e.  $\tilde{f}_5(t)$

图 10 水平截集  $\alpha=0$  和  $\alpha=1$  时的模糊状态概率  $\tilde{f}_i(t)$

Fig. 10 Fuzzy state probability  $\tilde{f}_i(t)$  at  $\alpha$ -cut lever 0 and 1

图 11 是风电机组液压系统在隶属度  $\alpha=0$  和  $\alpha=1$  下,系统工作时间在 0~45000 h 时的模糊可靠度曲线。由图 11 可知,随着时间的推移,液压系统可靠度呈下降趋势。在隶属度  $\alpha=0$  时,系统可靠度分别取得极限值;隶属度  $\alpha=1$  时的可靠度值是该时刻系统可靠度最可能的取值,并在隶属度  $\alpha=0$  时的可靠度曲线之间变化。同时,由于基本事件失效率的不确定性和失效概率值的不断增大,整个液压系统可靠度的不确定性也在逐渐增大。

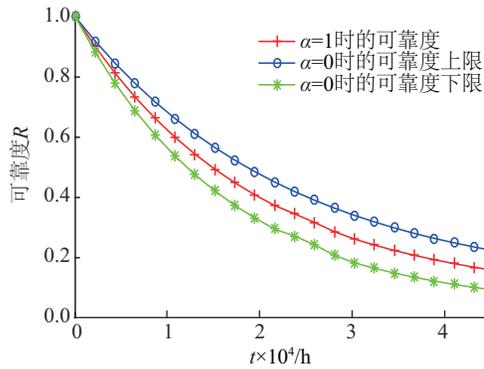


图 11 不同隶属度下系统模糊可靠度  
Fig. 11 Fuzzy reliability of the system at different membership

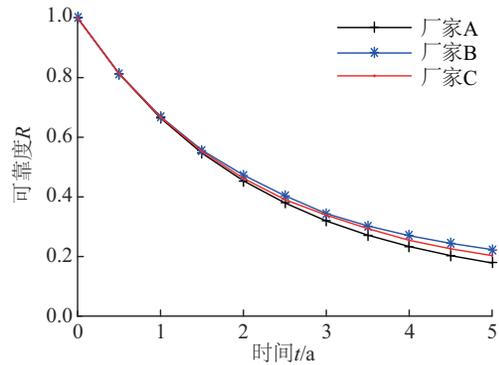


图 12 不同厂家产品在水平截集  $\alpha = 1$  的可靠度  
Fig. 12 Reliability of products from different manufacturers at  $\alpha = 1$

### 4 模糊失效率参数对液压系统可靠性影响

主机厂经常会选择使用多个厂家的液压产品,不仅可验证不同厂家生产的液压元件的可靠性,还可降低投资风险。国内外生产风电机组液压元件厂家主要有有川润、世万宝、重液、KTR、ABB 等。各家产品可靠性各不相同。结合某公司 2.0 MW 系列风电机组故障数据,对 3 个厂家液压产品可靠性进行评估。表 3 是不同厂家液压元件模糊失效率参数。

表 3 不同厂家液压元件模糊失效率参数  $\bar{p}_i (10^{-6}/h^{-1})$

Table 3 Fuzzy failure rate of hydraulic components of different manufacturers ( $10^{-6}/h^{-1}$ )

厂家	泵	蓄能器	继电器
A	[1.61432, 2.07555]	[1.72963, 2.90891]	[0.419881, 0.839763]
B	[5.72863, 8.72863]	[0.92808, 1.37808]	[0.256621, 1.013242]
C	[3.56120, 5.53480]	[1.29722, 3.89166]	[0.042500, 0.057500]

图 12 是不同厂家产品在水平截集  $\alpha = 1$  的可靠度曲线。从图 12 可看出,当液压系统工作时间小于 1.5 a 时,3 家产品可靠度相近;当液压系统工作时间超过 1.5 a 后,3 家产品的可靠性差异随时间的推移变得越来越大,可靠度从高到低依次为厂家 B、厂家 C、厂家 A。

假设液压系统中液压泵来自不同厂家,其他液压元件均来自同一厂家,研究液压泵模糊失效率参数对系统可靠性的影响。图 13 是模糊状态 2 在水平截集  $\alpha = 1$  的概率。从图 13 可看出,液压泵的模糊失效率越大,模糊状态 2 概率越大,即因液压泵故障导致供油故障发生的可能性越大,且随着时间的推移,模糊失效率参数对状态 2 概率的影响越来越明显。图 14 是模糊状态 5 在水平截集  $\alpha = 1$  的概率。由图 14 可知,液压泵模糊失效率越小,模糊状态 5 发生的概率越大,且变化规律与状态 2 相反。结合图 13、图 14 可知,液压泵模糊失效率增大,增加了状态 2 发生的概率,同时降低了模糊状态 5 发生的可能性。根据工程经验,可靠性设计者们希望液压系统失效发生在模糊状态 5 (即完全失效状态),使各元件都能物尽其用,达到各自的使用极限,所以合理选择不同厂家的液压元件,对液压元件可靠度进行合理匹配,能有效提高液压系统可靠性,降低投资风险和成本。

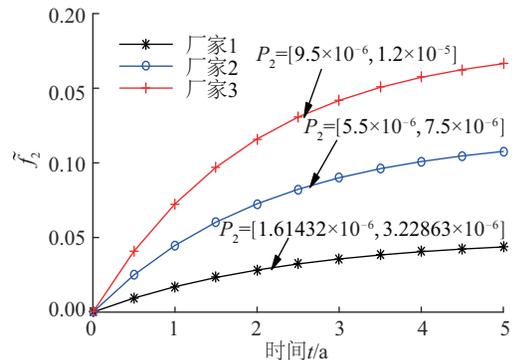


图 13 模糊状态 2 在水平截集  $\alpha = 1$  的概率  
Fig. 13 Probability of fuzzy state two at  $\alpha = 1$

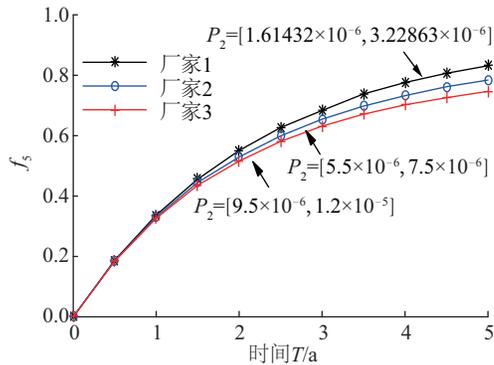


图 14 模糊状态 5 在水平截集  $\alpha=1$  的概率

Fig. 14 Probability of fuzzy state five at  $\alpha=1$

## 5 结 论

1) 根据风电机组液压系统工作原理和失效机理,建立了液压系统动态故障树模型,结合液压系统实际故障数据,运用基于马尔科夫链模型的模糊动态故障树分析方法对风电机组液压系统进行了可靠性建模和评估。

2) 对不同厂家的液压产品进行了可靠性分析,比较不同厂家产品的可靠度。同时,研究了模糊失效率参数对模糊状态概率的影响,结果表明,模糊失效率的大小对不同模糊状态概率的影响不同,研究结果对液压元件选择和可靠性匹配具有一定指导作用。

3) 基于马尔科夫链模型的模糊动态故障树的可靠性建模和评估方法能够有效准确地处理具有动态失效特性和失效率具有模糊不确定性的复杂装备系统。

### [参考文献]

[1] 朱正福,李长福,何恩山,等.基于马尔可夫链的动态故障树分析方法[J].兵工学报,2008,29(9):1104—1107.  
[1] Zhu Zhengfu, Li Changfu, He Enshan, et al. The dynamic fault tree analysis method based on Markov

chain[J]. Acta Armamentarii, 2008, 29(9): 1104—1107.

- [2] Amari S, Dill G, Howald E. A new approach to solve dynamic fault trees [A]. Reliability & Maintainability Symposium. IEEE[C], Tampa, FL, USA, 2003, 374—379.
- [3] Li Yanfeng, Huang Hongzhong, Liu Yu, et al. A new fault tree analysis method: Fuzzy dynamic fault tree analysis [J]. Eksploatacja i Niezawodnosć-Maintenance and Reliability, 2012, 14(3): 208—214.
- [4] Liu Yu, Huang Hongzhong. Reliability assessment for fuzzy multi-state systems [J]. International Journal of Systems Science, 2010, 41(4):365—379.
- [5] Liu Yu, Huang Hongzhong, Levitin G. Reliability and performance assessment for fuzzy multistate element [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers (Part O), Journal of Risk & Reliability, 2008, 222(4): 675—686.
- [6] 王家序,周青华,肖科,等.不完全共因失效系统动态故障树模型分析方法[J].系统工程与电子技术,2012,34(5):1062—1067.
- [6] Wang Jiaxu, Zhou Qinghua, Xiao Ke, et al. Dynamic fault tree model analysis of systems subjected to incomplete common-cause failure[J]. Systems Engineering & Electronics, 2012, 34(5): 1062—1067.
- [7] Zadeh L A. Fuzzy sets [J]. Information & Control, 1965, 8(3): 338—353.
- [8] Zadeh L A. Fuzzy sets as a basis for a theory of possibility [J]. Fuzzy Sets & Systems, 1978, 1(1): 3—28.
- [9] Williams T. Probability and statistics with reliability, queueing and computer science applications [J]. Journal of the Operational Research Society, 1983, 34(9): 916—917.
- [10] 董连俊.兆瓦级风力发电机组液压制动系统的设计与应用[J].液压气动与密封,2015,(2):42—45.
- [10] Dong Lianjun. Design and application of hydraulic brake system for mega-watt graded wind turbine [J]. Hydraulic Pneumatics & Seals, 2015, (2): 42—45.

## RELIABILITY MODELING AND ASSESSMENT OF DYNAMIC FAULT TREE FOR HYDRAULIC SYSTEM OF WIND TURBINES

Li Yao, Zhu Caichao, Song Chaosheng, Tan Jianjun

*(State Key Laboratory of Mechanical Transmissions, Chongqing University, Chongqing 400044, China)*

**Abstract:** The fuzzy number is used to characterize the failure rate parameters of basic events and the extension principle and Laplace-Stieltjes transform are used to solve the state transition equations for hydraulic system of wind turbine. The membership degree and fuzzy dynamic reliability corresponding to fuzzy failure rate are obtained, and the reliability evaluation of hydraulic system of wind turbine is carried out. The reliability evaluation of hydraulic products of different manufacturers is carried out to study the influence of hydraulic component failure rate parameters on the reliability of hydraulic system. It is pointed out that the reliability matching of hydraulic components plays an important role in improving the reliability of hydraulic system. Through the reliability modeling and analysis of the hydraulic system, it is verified that the method is feasible to solve the problem of uncertainty with dynamic failure characteristics and failure probability.

**Keywords:** wind turbines; hydraulic models; fault tree analysis; reliability analysis; Markov chains; fuzzy sets