

仪表技术

# 摩擦焊机液压施力系统故障率分析

王德海 杜随更\* 邵奇

(西北工业大学现代设计与集成制造技术教育部重点实验室,西安 710072)

**摘要** 采用模糊故障树分析方法,对C800型连续驱动摩擦焊机液压施力系统故障机理进行定性分析。通过分析故障形式,建立了适合摩擦焊机液压施力系统故障诊断的模糊故障树结构,并进行量化分析。推导出摩擦焊机液压施力系统故障顶事件发生的模糊概率及其隶属函数分布,为摩擦焊机液压系统设计、维护和保养提供了理论依据。

**关键词** 摩擦焊机 液压施力系统 模糊故障树 故障诊断

中图分类号 TH137.9; 文献标志码 A

摩擦焊接技术是一种优质、高效、低耗、清洁的先进制造技术,近年来在国内汽车、石油、工具等行业中得到了广泛的推广与应用,摩擦焊机制造业也得到了蓬勃发展<sup>[1]</sup>。但是随着摩擦焊机的自动化程度、控制精度等要求越来越高,故障率也随之增高,故障诊断越来越复杂。

国外先进摩擦焊机厂商如美国MTI、德国KUKA、英国THOMPSON、加拿大TECHNAR等均已配置故障智能诊断系统。如MTI焊机,其故障诊断系统在焊机的运行过程中能实时判断电机、泵是否过载和阀、传感器及过滤器等是否故障,以及是严重故障还是轻微故障。若严重过载或发生严重故障,则焊接过程中即可终止焊接程序,退出焊接循环,显示故障信息并报警;若是轻微故障,则待本次焊接循环结束后给出故障信息,报警告知及时维修<sup>[2]</sup>。相比之下,国内摩擦焊机在故障诊断方面还有很大的差距。国内摩擦焊机现在还不具备在焊接过程当中对泵、阀、液压缸等故障的实时状态监测,而仍然处于“坏了再修”的时代。为了缩小与国外的差距,提高

国内摩擦焊机的竞争力水平,摩擦焊机故障诊断系统研究与应用是非常有必要而迫切的。

目前,液压传动系统中的故障诊断主要有基于传递函数的故障诊断方法、基于人工智能(包括专家系统、神经网络两个分支)的故障诊断方法。前者由于需要建立系统控制过程的数学模型而遇到较大困难,后者又由于专家系统知识难以获取而难以推广应用<sup>[3]</sup>。模糊数学的引入解决了这一难题,它使液压设备故障诊断中的模糊现象的处理成为可能,为我们提供了一种新的故障诊断方法,即模糊故障树故障诊断方法<sup>[4,5]</sup>。

## 1 模糊故障诊断的数学基础

将液压系统中各元件发生故障的概率构成模糊数集合A。定义:模糊数集合A为实数域R上的正规凸模糊集,若其隶属函数满足

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

则称模糊数集合A为L-R型模糊数集, L(x)、R(x)称为模糊数的左、右参照函数<sup>[6,7]</sup>。式中:

L(x)为增函数,左连续,  $0 \leq L(x) \leq 1$ ,  $\lim_{x \rightarrow -\infty} L(x) = 0$

R(x)为减函数,右连续,  $0 \leq R(x) \leq 1$ ,  $\lim_{x \rightarrow +\infty} R(x) = 0$

2012年2月14日收到

第一作者简介:王德海(1986—),男,汉族,山东菏泽人,西北工业大学硕士研究生,研究方向:机电控制与自动化,故障诊断。

\*通信作者简介:杜随更(1963—),男,汉族,山西省运城人,博士,西北工业大学博士生导师,教授,研究方向:摩擦焊接工艺与技术及机电一体化。

隶属函数  $\mu_A(x)$  是 0 到 1 之间的一个数,它表示元素  $x$  对模糊集  $A$  的隶属程度。工程中,模糊数隶属度为 1 的数通常只有一点,因此模糊数集合  $A$  可表示为  $A = (m, \alpha, \beta)$ 。其中,  $m$  为  $A$  的均值;  $\alpha, \beta$  分别称为  $A$  的置信上下限。当  $\alpha$  和  $\beta$  都等于 0 时,  $A$  集合元素就不是模糊数。 $\alpha, \beta$  越大,  $A$  集合元素就越模糊<sup>[7]</sup>。

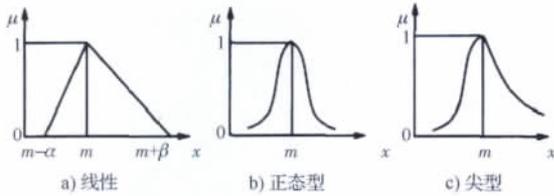


图 1 模糊隶属函数曲线<sup>[7]</sup>

常用的  $L-R$  参照函数有线性、正态型、尖型(见图 1)<sup>[7]</sup>。黄洪钟、华小洋<sup>[8]</sup>等认为利用正态型模糊隶属函数描述底事件的模糊概率比较合理,因此本文采用正态型参照函数,其左右参照函数为:

$$\begin{cases} L(x) = \exp\left[-\left(\frac{m-x}{\alpha}\right)^2\right]; & x < m, \alpha > 0 \\ R(x) = \exp\left[-\left(\frac{x-m}{\beta}\right)^2\right]; & x > m, \beta > 0 \end{cases} \quad (2)$$

设模糊数集  $A_1$  和  $A_2$  分别用  $(m_1, \alpha_1, \beta_1)$  和  $(m_2, \alpha_2, \beta_2)$  表示,则其乘法运算法则为:

$$A_1 \times A_2 = (m_1, \alpha_1, \beta_1) \times (m_2, \alpha_2, \beta_2) = (m_1 m_2, \alpha_1 \alpha_2, \beta_1 \beta_2)。$$

传统的故障树分析中,顶事件发生的概率可通过底事件的概率和隶属函数来唯一确定,模糊故障树亦是如此。在模糊乘法运算法则的基础上,定义或门模糊算子如下<sup>[9]</sup>:

$$\begin{aligned} P_{OR} &= 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i) = (P_{OR}^m, P_{OR}^\alpha, P_{OR}^\beta); \\ P_{OR} &= 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - (m_i, \alpha_i, \beta_i)) = \\ &= \left(1 - \prod_{i=1}^n (1 - m_i), 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \alpha_i), 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \beta_i)\right) \end{aligned} \quad (3)$$

根据式(3)所得到的或门结构模糊算子,根据底事件的概率和故障树的模糊隶属函数即可计算出系统顶事件发生的概率。

## 2 系统分析与模糊故障树的建立

无论采用哪种诊断方法,对诊断对象进行故障机理分析都是必不可少的。故障机理分析的主要任务就是剖析故障现象与故障原因之间的关系,并构建故障诊断系统的总体框架。故障机理正确分析的前提是对系统有全面而且必须正确的了解。总体上,摩擦焊机液压系统包括润滑系统、辅助系统和施力系统三大块,润滑系统承担摩擦焊机整个主轴箱的润滑任务,辅助系统包括移夹夹紧/松开油路、旋夹夹紧/松开油路、主轴离合/制动油路及为施力系统比例变量泵提供控制压力的供压控制油路,而施力系统则控制滑台前进、后退与停止。由于篇幅限制,这里只讨论摩擦焊机液压施力系统的故障诊断,其液压原理如图 2 所示。

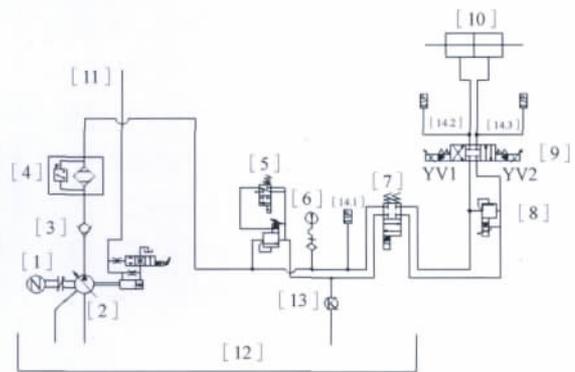


图 2 C800 故障诊断型摩擦焊机液压施力系统原理

1—三相电动机,2—比例变量泵,3—单向阀,4—高压过滤器,5—电磁溢流阀,6—压力表,7—电磁换向阀,8—先导式比例溢流阀,9—先导式比例换向阀,10—主推力缸,11—比例变量泵供油控制油路,12—油箱,13—流量计,14—压力传感器

### 2.1 液压施力系统定性分析

施力系统通过泵、阀及液压缸控制滑台前进、后退与停止,压力闭环控制就是通过控制先导比例溢流阀 8、先导式比例换向阀 9 和比例变量泵 2 来实现压力闭环稳定的。如施力系统接到“快进”信号,比例变量泵 2 以设定的快进流量输出,电磁溢流阀 5 通电建压,电磁换向阀 7 通电导通,同时计算机向先导比例换向阀 9 输出最大 +10 V 电压信号, P 口与 A 口完全导通,压力油快速进入 A 腔, B 口与 T 口导通, B 腔泄油,推动滑台快速前进。

故障就是指指令的输出期望响应与设备的实际响应不一致的外在表现。如计算机输出“快进”指令,当然是期望滑台能以工艺参数设置中的“快进速度”向前移动,但是实际响应是“滑台无动作”,这就说明施力系统出现了故障。可能是比例变量泵2内部配油盘因磨损严重导致泄漏大而输出流量小,或过滤器4堵塞导致压力油不能通过,或电磁溢流阀5或先导比例溢流阀8故障导致系统未建立压力,或电磁换向阀7或先导比例换向阀9的阀芯卡死而未能换向导通,或液压缸10的活塞环失效或活塞磨损严重致使泄漏增大,使液压缸前后腔无压力差而无法推动滑台。

### 2.2 故障树的建立

对于摩擦焊机液压施力系统,由于各元件在系统中相对独立,因此可以把各个元件看作故障子系统,确定为中间事件,逐级向下建树。按照这种思路,下面以“施力系统故障导致按下‘焊接启动’按钮滑台不动作”故障为例进行故障树的搭建,所以顶事件  $T = \{ \text{施力系统故障} \}$ ,出现故障的各种具体原因为故障树的底事件,用  $X$  表示,包含多个具体原因的事件为中间事件,用  $E$  表示。图3给出了建立的摩擦焊机液压施力系统故障树结构。

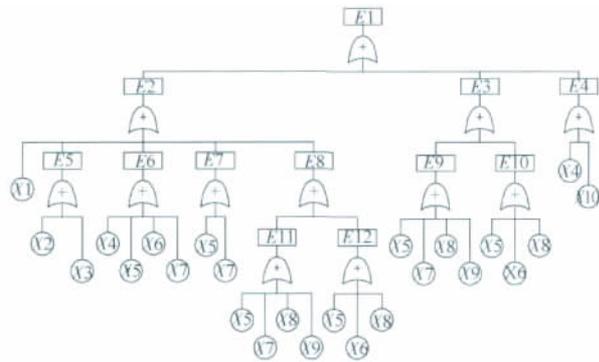


图3 摩擦焊机施力液压系统故障树结构

E1—施力系统故障, E2—施力系统未建压, E3—先导式比例换向阀, E4—液压缸故障, E5—比例变量泵, E6—电磁溢流阀, E7—电磁换向阀, E8—先导比例溢流阀, E9—先导比例换向阀, E10—先导比例换向阀主阀, E11—先导比例溢流阀先导阀, E12—先导比例溢流阀主阀, X1—过滤器堵塞, X2—中心弹簧折断, X3—泵磨损严重泄漏大, X4—密封件失效, X5—阀芯卡死, X6—阻尼孔堵塞, X7—电磁铁线圈烧坏, X8—弹簧损坏, X9—先导通道堵塞, X10—活塞磨损

焊机液压施力系统故障树建立之后,再通过下行法求得该故障树的最小割集为:  $\{ X1 \}$ 、 $\{ X2 \}$ 、 $\{ X3 \}$ 、 $\{ X4 \}$ 、 $\{ X5 \}$ 、 $\{ X6 \}$ 、 $\{ X7 \}$ 、 $\{ X8 \}$ 、 $\{ X9 \}$ 、 $\{ X10 \}$ 。

### 3 模糊故障诊断分析

故障树中各事件发生的概率用故障数来表示,事件发生概率  $P_i$  的参照函数为正态对称型,其隶属函数如式(2)所示,且与均值  $m_i$  相差  $\pm 50\%$  的点  $x$  的隶属度为 0.08,则有式(4)。

$$\exp\left[-\left(\frac{m_i - x}{\alpha_i}\right)^2\right] = \exp\left[-\left(\frac{0.5m_i}{\alpha_i}\right)^2\right] = 0.08 \quad (4)$$

则可计算出  $\alpha_i = \beta_i = 0.315m_i$ ,各底事件的故障概率均值  $m_i$  及左右分布  $\alpha_i, \beta_i$  如表1所示。

表1 底事件的故障概率均值  $m_i$  及左右  $\alpha_i, \beta_i$  分布<sup>[4, 10]</sup>

代号	基本事件	均值 $m_i$ ( $\times 10^{-5}$ )	$\alpha_i, \beta_i$ 分布 ( $\times 10^{-5}$ )
X1	过滤器堵塞	10	3.15
X2	中心弹簧折断	4	1.26
X3	泵磨损泄漏大	40	12.6
X4	密封件失效	9	2.84
X5	阀芯卡死	10	3.15
X6	阻尼孔堵塞	30	9.45
X7	电磁铁线圈烧坏	30	9.45
X8	弹簧损坏	8	2.52
X9	先导通道堵塞	20	6.3
X10	活塞磨损	2	0.63

由系统最小割集,根据公式(3),可得到相应的顶事件发生概率的模糊函数为:

$$\begin{cases} P_{E5} = 1 - (1 - P_{X2})(1 - P_{X3}) \\ P_{E6} = 1 - (1 - P_{X4})(1 - P_{X5})(1 - P_{X6})(1 - P_{X7}) \\ P_{E7} = 1 - (1 - P_{X5})(1 - P_{X7}) \\ P_{E11} = 1 - (1 - P_{X5})(1 - P_{X7})(1 - P_{X8})(1 - P_{X9}) \\ P_{E12} = 1 - (1 - P_{X5})(1 - P_{X6})(1 - P_{X8}) \\ P_{E8} = 1 - (1 - P_{E11})(1 - P_{E12}) \\ P_{E9} = 1 - (1 - P_{X5})(1 - P_{X7})(1 - P_{X8})(1 - P_{X9}) \\ P_{E10} = 1 - (1 - P_{X5})(1 - P_{X6})(1 - P_{X8}) \\ P_{E2} = 1 - (1 - P_{X1})(1 - P_{E5})(1 - P_{E6})(1 - P_{E7})(1 - P_{E8}) \\ P_{E3} = 1 - (1 - P_{E9})(1 - P_{E10}) \\ P_{E4} = 1 - (1 - P_{X4})(1 - P_{X10}) \\ P_T = P_{E1} = 1 - (1 - P_{E2})(1 - P_{E3})(1 - P_{E4}) \end{cases} \quad (5)$$

由公式(5)可得中间事件的故障概率均值  $m_i$  及左右分布  $\alpha_i, \beta_i$ , 如表 2 所示。

表 2 中间事件的故障概率均值  $m_i$  及左右  $\alpha_i, \beta_i$  分布

代号	基本事件	均值 $m_i (\times 10^{-4})$	$\alpha_i, \beta_i$ 分布 ( $\times 10^{-4}$ )
E2	施力系统未建压	33.21	9.08
E3	先导比例换向阀	11.6	3.66
E4	液压缸故障	1.13	0.34
E5	比例变量泵	4.45	1.39
E6	电磁溢流阀	7.9	2.49
E7	电磁换向阀	4.1	1.26
E8	先导比例溢流阀	11.6	3.65
E9	先导换向阀先导阀	6.8	2.14
E10	先导换向阀主阀	4.8	1.53
E11	先导溢流阀先导阀	6.8	2.14
E12	先导溢流阀主阀	4.8	1.53

从表 2 中故障概率模糊数可以看出,施力系统主要故障是系统未建压,然后是先导比例换向阀故障,最不可能发生的就是液压缸故障。施力系统未建压又主要是因为先导比例溢流阀故障,然后是电磁溢流阀故障,再者是比例变量泵故障。因此在设计液压系统时应特别注意先导比例溢流阀、先导比例方向阀、电磁溢流阀及液压泵的选用、维护和保养。当然,当系统出现故障时,这些液压元件也是故障诊断的首要检测对象。所以,本文分析为设计、维护和保养摩擦焊机液压系统提供了良好的依据。

## 4 结论

(1) 采用模糊故障树分析法可以对摩擦焊机施力液压系统故障率进行定量分析。

(2) 摩擦焊机液压施力系统的主要故障是系统未建压及两个先导比例阀故障。

## 参 考 文 献

- 杜随更, 鄢君辉, 傅莉. 计算机闭环控制系统在摩擦焊接中的应用. 机械科学与技术, 2004; (3): 300—301
- 美国 MTI. 《320BX 型惯性摩擦焊机说明书》: 164—170
- 戴智华, 王飞, 林贇. 基于模糊故障树的液压系统故障诊断方法研究与应用. 液压气动与密封, 2002; (4): 7—8
- 李瑰贤, 于广滨, 马良. 基于模糊故障树直升机起落架液压系统的故障诊断方法研究. 机床与液压, 2007; 35(5): 214—215
- Pedrycz W. Genetically optimized fuzzy decision trees. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics-Part B: Cybernetics, 2005; 35(3): 633—641
- 刘少辉, 林少芬, 江小霞, 等. 基于模糊故障树分析法的舵机液压系统可靠性研究. 船舶工程, 2008; 30(5): 27—28
- 丰世林. 基于模糊故障树的民航运输机着陆防滞刹车系统故障诊断研究. 液压与气动, 2010; (5): 77—78
- 张晓丽, 等. 基于不确定性分析的模糊故障树的模糊数选择. 重庆工学院学报, 2005; (5): 19—22
- 牛同训. 基于模糊故障树的电动机温升分析. 煤矿机械, 2010; 31(5): 255—256
- 成大先. 机械设计手册: 液压传动. 北京: 化学工业出版社, 2004: 44—45

## Fault Rate Analysis on Hydraulic Load System of Friction Welding Machine

WANG De-hai, DU Sui-geng\*, SHAO Qi

(Key Laboratory of Ministry of Education for Contemporary Design and Integrated Manufacturing Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, P. R. China)

**[Abstract]** Using the fuzzy fault tree analysis method, the qualitative analysis of hydraulic load system fault mechanism of friction welding machine is presented whose model is C800 of continuous drive. Through the analysis of failure mode, the fuzzy fault tree structure is built which is suitable for hydraulic load system fault diagnosis of friction welding machine, and carried on quantitative analysis. The distribution of the membership function and the fuzzy probability value of the top event when the hydraulic system of friction welding machine cannot work is derived. The theoretical foundation is supplied for hydraulic system design and maintenance of friction welding machine.

**[Key words]** friction welding machine hydraulic load system fuzzy fault tree fault diagnosis