

# 灰色系统理论在液压系统故障树分析中的应用

王灵玲<sup>1</sup> 陈子珍<sup>1</sup> 曲晓海<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 宁波职业技术学院, 宁波 315800)(<sup>2</sup> 吉林大学 工程训练中心, 长春 130025)

## Application of grey system theory in fault tree analysis of hydraulic system

WANG Ling-ling<sup>1</sup>, CHEN Zi-zhen<sup>1</sup>, QU Xiao-hai<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Ningbo Polytechnic, Ningbo 315800, China)

(<sup>2</sup> Enging Training Center of Jilin University, Changchun 130025, China)

**【摘要】**在液压系统故障树分析中,运用灰色关联分析,通过关联度计算及排序,对造成顶事件发生的各种故障模式可能性大小作出判断。

**关键词:**灰色系统;液压系统;故障树

**【Abstract】** Grey correlation analysis is applied in the fault tree analysis of hydraulic system. The possibility of fault model could be judged correctly by calculating correlation degree and Sorting.

**Key words:** Grey system; Hydraulic System; Fault tree

中图分类号: TH16 文献标识码: A

### 1 前言

灰色系统理论中的关联度分析是分析和处理随机变量的一种方法,一般多用于纵向序列(如时间序列)的分析,但根据该方法的基本思想可知,它也可通过数据的“映射”关系对系统的不同状态进行比较,从而识别系统故障。液压系统发生故障的原因是多方面的,再加上故障检测手段的不完善性,信号获取装置的不稳定性及信息处理方法的近似性,造成信息不完全。另外,在生产过程中产生的故障往往呈现出一定的动态性。由此,液压系统故障由于信息的不完全,可看作是一个复杂的灰色系统。

运用灰色关联分析技术来处理液压系统故障树分析中造成顶事件发生的各种故障模式可能性大小的关系。

### 2 灰色关联分析

灰色关联度是表征两个灰色系统之间相似性的一种指标。设有两个数列 $\{X_i(t), X_j(t)\}$ ,在 $t=k$ 时刻,其间的关联度定义为:

$$r_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \varepsilon_{ij}(k) \quad (1)$$

$$\text{其中, 关联系数: } \varepsilon_{ij}(k) = \frac{\Delta_{\min} + \rho \Delta_{\max}}{\Delta_{ij}(k) + \rho \Delta_{\max}} \quad (2)$$

式中: $\Delta_{ij}(k)$ — $k$ 时刻两个数列的绝对差。即:

$$\Delta_{ij}(k) = |X_i(k) - X_j(k)| \quad (3)$$

$\Delta_{\max}$ 、 $\Delta_{\min}$ 分别为所有绝对差中的最大值与最小值; $\rho$ 为分辨系数, $0 < \rho < 1$ ,一般取 $\rho = 0.5$ 。

### 3 故障模式识别中的灰色关联分析原理

设有 $k$ 个典型故障,每种典型故障可以由几个特征参数构成一个特征向量。由这 $k$ 个特征向量构成一个典型故障的特征矩阵:

$$[X_R] = \begin{bmatrix} X_{R1} \\ X_{R2} \\ \dots \\ X_{Rk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{R1}(1) & X_{R1}(2) & \dots & X_{R1}(n) \\ X_{R2}(1) & X_{R2}(2) & \dots & X_{R2}(n) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{Rk}(1) & X_{Rk}(2) & \dots & X_{Rk}(n) \end{bmatrix} \quad (4)$$

若有组待检数据,同理可构成待检数据特征矩阵:

$$[X_T] = \begin{bmatrix} X_{T1} \\ X_{T2} \\ \dots \\ X_{Tp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{T1}(1) & X_{T1}(2) & \dots & X_{T1}(n) \\ X_{T2}(1) & X_{T2}(2) & \dots & X_{T2}(n) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{Tp}(1) & X_{Tp}(2) & \dots & X_{Tp}(n) \end{bmatrix} \quad (5)$$

每一个特征向量都代表一种“故障模式”,故障诊断可归结为对待检模式进行故障模式识别的问题。在灰色诊断中,可利用关联度分析来进行故障模式识别,称之为灰色故障模式识别。其基本原理,如图1所示。

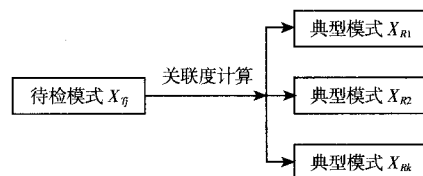


图1 灰色故障模式识别原理图

设第 $j$ 个待检模式向量为 $\{X_{Tj}\}$ ,通过将其与典型模式向量 $\{X_{Ri}\}(i=1,2,\dots,K)$ 之间的关联度的计算,可以得到关联度序列:

$$\{r_{TjRi}\} = \{r_{TjR1}, r_{TjR2}, \dots, r_{TjRk}\}。$$

若把关联度序列从大到小依次排列: $r_{TjRi} > r_{TjRk} > r_{TjRj} > \dots$ ,则提供了待检模式 $\{X_{Tj}\}$ 划归某种典型模式可能性大小的顺序,从而为诊断决策提供了依据,对于其它待检模式亦可进行相同处理。

### 4 灰色关联分析在故障树分析中的引进

在故障树分析中,导致故障树顶事件发生的底事件可能有许多种不同的组合,每一种底事件的组合称之为一个割集。而最小割集是导致故障树顶事件发生的数量不可再少的底事件的组合,它代表引起故障树顶事件发生的一种故障模式。

设 $T$ 为顶事件, $K_i(i=1,2,\dots,m)$ 为最小割集, $m$ 是给定故障树的最小割集数。底事件为 $X_j(j=1,2,\dots,n)$ 。其结构函数可表示为:

$$\varphi(x) = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_n) = \begin{cases} 1 & \text{顶事件发生} \\ 0 & \text{顶事件不发生} \end{cases}$$

第 $i$ 个最小割 $k$ 集 $n$ 由个底事件 $x_1, x_2, \dots, x_m$ 组合而成,在最小

割集  $k$  中,不妨令  $n_1$  个底事件全为“1”,其余的个底事件为“0”,这样由  $(n-n_1)$  个最小割集就构成了一个典型故障的特征矩阵:(略)

为了求得导致故障树顶事件发生的各种故障模式(亦即  $m$  个最小割集)发生的可能性,可以从底事件的重要度入手来加以分析。不同的底事件,对于顶事件发生与否的影响程度是不一样的,亦即其重要度不尽相同。重要度有多种定义,如结构重要度、概率重要度、关键重要度和 FV-重要度等<sup>[9]</sup>。其中,关键重要度不仅体现了底事件在故障树中的地位,而且还体现了事件本身的不可靠度,所以它能更客观地体现部件对系统故障树的影响<sup>[9]</sup>。

$n$  个底事件按其重要度组成一组待检数据  $\{X_\pi\}$ :

$$X_\pi = \{X_\pi(1), X_\pi(2), \dots, X_\pi(n)\}$$

通过  $\{X_\pi\}$  与典型模式向量之间的灰色关联度计算,可以得出关联度序列。从而可得出待检模式划归为某种典型模式可能性大小的顺序。

### 5 应用实例

某液压缸不动作事故的故障树,如图 2 所示。如表 1 所示,各底事件的关键重要度。

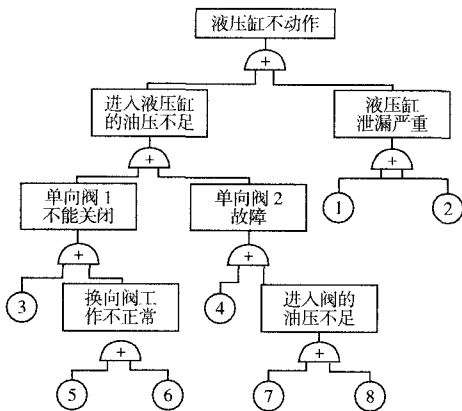


图 2 某液压缸不动作事故的故障树

表 1 各底事件的关键重要度

底事件	关键重要度	底事件	关键重要度
$I_1$	0.100832	$I_5$	0.100832
$I_2$	0.019951	$I_6$	0.147744
$I_3$	0.099754	$I_7$	0.113774
$I_4$	0.147744	$I_8$	0.269338

#### 5.1 求出最小割集

依照“上行法”求出最小割集为:

$$T_{k1} = \{1\}, T_{k2} = \{2\}, T_{k3} = \{3\}, T_{k4} = \{4\}$$

$$T_{k5} = \{5\}, T_{k6} = \{6\}, T_{k7} = \{7\}, T_{k8} = \{8\}$$

#### 5.2 建立故障的特征矩阵

底事件为 8 个,即  $n=8$ ;最小割集中所包含的底事件在特征矩阵中取“1”,其余的取“0”,则

$$T_k = \begin{pmatrix} T_{k1} \\ T_{k2} \\ T_{k3} \\ T_{k4} \\ T_{k5} \\ T_{k6} \\ T_{k7} \\ T_{k8} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

#### 5.3 待检模式向量的确定

依据各底事件的重要度,确定如下待检模式向量:

$$X_\pi = \{0.100832, 0.019951, 0.099754, 0.147744, 0.100832, 0.147744, 0.1133774, 0.269338\}$$

#### 5.4 计算关联度

$X_\pi$  以为母因素,以  $T_{ki}(i=1, 2, 3, \dots, 8)$  为子因素

(1)将原始数据初始化处理:

$$X_\pi = \left\{ \begin{matrix} 0.100832 & 0.019551 & 0.099754 & 0.147744 \\ 0.100832 & 0.100832 & 0.100832 & 0.100832 \\ 0.100832 & 0.147744 & 0.113774 & 0.269338 \\ 0.100832 & 0.100832 & 0.100832 & 0.100832 \end{matrix} \right\}$$

$$= \{1, 0.197864, 0.989309, 1.465249, 1, 1.465249, 1.128352, 2.671156\}$$

(2)求差序列

由式  $\Delta_{mk}(k) = |X_\pi(k) - T_{ki}(k)| (i=1, 2, 3, \dots, 8; k=1, 2, 3, \dots, 8)$  计算因篇幅有限,计算过程略

(3)求两级最大差和最小差,由上步可得  $\Delta_{\max} = 2.671156; \Delta_{\min} = 0$

(4)计算关联系数,取  $\rho=0.5$ ,由式(2)求得,如表 2 所示。

表 2 关联系数

	$K=1$	$K=2$	$K=3$	$K=4$	$K=5$	$K=6$	$K=7$	$K=8$
$I=1$	1	0.8709	0.5744	0.4768	0.5718	0.4768	0.5420	0.3333
$I=2$	0.5718	0.6247	0.5744	0.4768	0.5718	0.4768	0.5420	0.3333
$I=3$	0.5718	0.8709	0.9920	0.4768	0.5718	0.4768	0.5420	0.3333
$I=4$	0.5718	0.8709	0.5744	0.7416	0.5718	0.4768	0.5420	0.3333
$I=5$	0.5718	0.8709	0.5744	0.4768	1	0.4768	0.5420	0.3333
$I=6$	0.5718	0.8709	0.5744	0.4768	0.5718	0.7416	0.5420	0.3333
$I=7$	0.5718	0.8709	0.5744	0.4768	0.5718	0.4768	0.9123	0.3333
$I=8$	0.5718	0.8709	0.5744	0.4768	0.5718	0.4768	0.5420	0.4441

(5)计算关联度由式(1)可得

$$r_{mk1} = 0.605796 \quad r_{mk2} = 0.521501 \quad r_{mk3} = 0.604474 \quad r_{mk4} = 0.585375$$

$$r_{mk5} = 0.605796 \quad r_{mk6} = 0.585375 \quad r_{mk7} = 0.59856 \quad r_{mk8} = 0.566134$$

(6)排出关联序

$X_{ki}$  对  $X_\pi$  的关联序为  $r_{mk5} > r_{mk3} > r_{mk7} > r_{mk4} > r_{mk6} > r_{mk8} > r_{mk2}$ 。由此可知,造成该液压缸不动作事故的 8 种故障模式发生的可能性大小依次为(由大到小排列,之间没有逗号为并列):  $\{X_5\}, \{X_3\}, \{X_7\}, \{X_4\}, \{X_6\}, \{X_8\}, \{X_2\}$

### 6 结论

在液压系统故障树分析中,运用灰色关联分析技术,对造成顶事件发生的各种故障模式可能性大小作出判断。从而为处理事故的轻重缓急、控制事故的发生、改进系统可靠性和安全性提供了理论依据。

#### 参考文献

- 1 邓聚龙. 灰色系统基本方法[M]. 武汉:华中理工大学出版社,1996
- 2 孙红梅等. 关于故障树分析中几种典型重要度的研究[J]. 电子产品可靠性与环境试验,2007,25(2):39-42
- 3 赵静一等. 高炉炉顶液压系统的设计及故障树分析[J]. 冶金设备,2006,156(2):58-61