

液压系统故障的识别与诊断

童 心

(西北工业大学自控系, 西安)

摘要 本文根据不同级别的故障诊断技术要求和液压系统特点, 从压力脉动信号中提取故障信息, 采用自回归模型参数作故障特征、用模式识别技术对系统各种状态进行分类, 形成一种液压系统故障识别与诊断的方法。在泵源系统故障诊断试验研究中, 采用三种分类方法, 对不同传感器位置、不同模型阶次和样本容量时的确诊率、漏警率和虚警率作了比较。诊断方法原理正确, 效果良好, 具有很好的应用前景。

关键词: 液压系统, 压力脉动, 故障特征, 模式识别, 故障识别, 故障诊断

1 概述

由现代机器设备的高可靠性和良好维修性要求出发, 很多关键工业部门逐渐发展了机器状态监测及控制技术、故障诊断技术、并且和计算机技术结合形成DCS(诊断通讯系统)。对发电站、加工中心、飞机的运行状态进行监控和诊断, 是最早应用这些技术的领域。故障诊断技术是改进可靠性-维修性-有效性的核心技术之一, 成为引人瞩目的研究课题。

1.1 故障诊断的任务

1.1.1 故障的检测

用以判断系统或设备是否有故障, 如有, 则报警或同时进行停车或切换。

1.1.2 故障的定位

用以判断故障发生的部位或部件, 提供维修所需的信息, 又称故障的隔离。

1.1.3 故障的识别

用以定性(确定故障发生的原因或性质)或定量(确定参数变化的范围或规律)地描述故障。除较完整的提供维修所需的信息外, 还可预测及预报故障, 提供改进设计的信息。

1.2 液压系统故障诊断的特点

液压系统由于功率重量比大, 快速性好, 一直广为军用和民用工业所采用。但是其可靠性较低, 维护工作量大, 亦是众所周知的。因此液压系统的故障诊断尤其具有重大意义。液压系统有如下特点:

1.2.1 液压系统元件的运动形式多样, 而且又是封闭系统, 内部的测试往往会影响系统特

性, 造成参数可测性差。

1.2.2 油液的粘性和所含空气量变化的非线性, 以及其他非线性因素影响, 使得系统理论的应用有很大的困难。

1.2.3 经过一段运行后, 除密封件外, 一般元件由于配合、磨损的关系, 不经过加工, 不能随意更换。因此不要求将故障隔离到元件上, 只需隔离到可更换部件或可更换元件上。

2 故障诊断的技术要求

2.1 故障诊断水平

根据故障检测、定位、识别要求的不同, 可以划分成三个级别:

第一级诊断水平: 对系统状态进行检测, 确定是否正常。

第二级诊断水平: 在第一级诊断的基础上, 对可更换部件(元件)是否发生故障进行判别, 适应于简单故障定位的要求。飞机机内检测即属于此级诊断。

第三级诊断水平: 不同原因导致的故障具有不同的表现状态, 从而构成不同的故障状态。将一种故障状态与其他相区别, 亦即对发生故障的原因进行识别, 以便采取维修措施或改进设计。随系统结构复杂程度不同, 和故障造成的危害程度不同, 需加以区别的状态数可能很多。需分类的状态数越多, 故障诊断的难度越大。即使每个可更换的部件处都安置有某

国家自然科学基金资助课题

收到本文的时间是1988年4月30日。

种传感器,也未必能够判别出发生故障的原因。但是为了提高系统或设备的有效性,这级诊断无疑是必要的,加工中心的诊断即属于此级。

应指出的是,系统发生的故障并不都是简单故障。由于连锁和诱发的作用,多个部位或部件会同时发生故障,而这些复合故障状态又区别于简单故障状态。当然还不能排除独立故障同时发生的可能。此级诊断适应于简单故障、复合故障识别的要求。

2.2 系统的虚警率、漏警率和确警率

虚警率 P_X :系统正常而告警的概率,

漏警率 P_L :系统有故障而未告警的概率,

确警率 P_C :对系统状态作出正确报告的概率。

以上是评价系统故障诊断方法的指标。不论对诊断水平要求的级别如何,都应给出这些指标。

2.3 误诊率

对各种状态进行正确分类的概率称确诊率。如待分类的状态已定,则可列出状态分类矩阵,见表1。设

系统 $S = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_j, \dots, x_N)$

$$S = \begin{cases} 0 & \text{系统处正常状态} \\ 1 & \text{系统处故障状态} \end{cases}$$

其中 $x_j = \begin{cases} 0 & \text{第}j\text{部件正常状态, } j=1,2,\dots,N \\ 1 & \text{第}j\text{部件故障状态} \end{cases}$

$$x_j = (x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jk}, \dots)$$

$$x_{jk} = \begin{cases} 1 & \text{第}k\text{原因导致第}j\text{部件故障} \\ 0 & \text{第}k\text{原因未致第}j\text{部件故障} \end{cases}$$

为了适应各种水平的诊断,以 S_1 规定为系统的正常状态, S_i 表示故障状态, $i=2,3,\dots,m$ 。

$$S_i = \begin{cases} 1 & \text{第}i\text{状态出现} \\ 0 & \text{第}i\text{状态未出现} \end{cases} \quad i=1,2,\dots,m$$

则又可表示系统

$$S = (S_1, S_2, \dots, S_m)$$

如设 N_i :第 i 状态所取样本数

n_{ij} :将第 i 状态判为第 j 状态的样本数

则确诊率可以表示为

表 1 状态分类矩阵

诊断状态 \ 实际状态	$S_1 = 1$	$S_2 = 1$	$S_3 = 1$...	$S_j = 1$...	$S_m = 1$
$S_1 = 1$	P_{C1}	P_{X2}	P_{X3}	...	P_{Xi}	...	P_{Xm}
$S_2 = 1$	P_{L2}	P_{C22}	P_{W23}	...	P_{W2i}	...	P_{W2m}
$S_3 = 1$	P_{L3}	P_{W32}	P_{C23}	...	P_{W3i}	...	P_{W3m}
...
$S_j = 1$	P_{Lj}	P_{Wj2}	P_{Wj3}	...	P_{C2j}	...	P_{Wjm}
...
$S_m = 1$	P_{Lm}	P_{Wm2}	P_{Wm3}	...	P_{Wmi}	...	P_{C2m}

$$P_{C1} = \frac{n_{11}}{N_1} \quad (1)$$

$$P_{C2i} = \frac{n_{ii}}{N_i}, \quad i=2,3,\dots,m \quad (2)$$

$$P_C = \frac{\sum_{i=1}^m n_{ii}}{\sum_{i=1}^m N_i} \quad (3)$$

(1) 适于对系统正常状态的判别, (2) 适于对某指定状态的判别, (3) 适于对一种故障诊断方法的评价。与此相类似地

$$\text{对虚警率 } P_{Xi} = \frac{n_{1i}}{N_1}, \quad i=2,3,\dots,m \quad (4)$$

$$P_X = \frac{\sum_{i=2}^m n_{1i}}{N_1} \quad (5)$$

$$\text{对漏警率 } P_{Li} = \frac{n_{i1}}{N_i}, \quad i=2,3,\dots,m \quad (6)$$

$$P_L = \frac{\sum_{i=2}^m n_{i1}}{\sum_{i=2}^m N_i} \quad (7)$$

$$\text{对误诊率 } P_{Wij} = \frac{n_{ij}}{N_i}, \quad i,j=2,3,\dots,m, i \neq j \quad (8)$$

$$P_{Wi} = \sum_{\substack{j=2 \\ j \neq i}}^m \frac{n_{ij}}{N_i}, \quad i=2,3,\dots,m \quad (9)$$

$$P_W = \frac{\sum_{\substack{i,j=2 \\ i \neq j}}^m n_{ij}}{\sum_{i=2}^m N_i} \quad (10)$$

(4), (6), (9)适于对某指定状态的判别, 而(5), (7), (10)适于对一种故障诊断方法的评价。

2.4 状态的确定

故障树是人们熟知的一种失效分析方法。将其与故障影响、后果及致命性分析技术结合(FMECA), 选择出发生概率及重要度高的状态, 列入状态分类矩阵。这些状态对于可靠性-维修性-有效性(RMA)要求而言是必须加以判别或区分的。状态数的增加, 导致诊断难度的加大。状态数的多少及其性质决定了故障诊断的分辨率。电子、电气系统按将故障隔离的集合中包含的元件数多少, 来衡量分辨率。而液压系统根据其自身的特点, 在可更换部件(元件)数一定时, 按可识别或可分类的状态数多少来衡量分辨率。

如得到正确的分类结果, 凡列入待分类状态阵中的状态必须是互斥的。因此多个状态同时发生的情况必须列成新的状态。未列入的状态、假设其发生的概率为零。

2.5 可达性和故障诊断的有效性

假设每个测点引出一个测试量。如 i 第个测试量包含第 j 部件(或第 i 状态, 视诊断水平而定)的状态信息, 则称第 i 测试量对第 j 部件(或状态)具有可达性。测试量一定后, 选择测点位置, 可达的部件(或状态)越多, 有效性越高。如要求分类的状态数一定, 则测点数越少, 有效性越高。

对于规定的待分类状态, 虽然选择的测点和测试量具有可达性, 但要达到高确诊率, 低漏诊率, 低虚诊率, 还要取决于故障特征的提取和分类方法的选择。

故障诊断有效性是反映诊断水平、分辨率、确诊率等诊断技术要求和经济性、时间性的综合指标。我们建立了有效性测度, 在系统故障模拟试验中进行了反复的验证研究。

3 测试信号的选择和故障特征的提取

3.1 测试信号的选择

为了满足故障诊断的各项技术要求, 必须慎重选择测试信号及测点位置。方法有:

3.1.1 增加测点, 从测试量中提取状态信息, 直到将各种状态区分开, 满足故障诊断要求为止。为此, 测点数和测试量形式不受限制。这样做的好处是诊断时间短、直观。但由于空间、重量等限制, 往往测点很多, 维护工作量很大, 而仍不能满足要求。

3.1.2 适当选择测点, 通过系统模型参数估计中提取状态信息, 选择建模方法、模型阶次和故障特征量, 直到将各种状态区分开, 满足故障诊断要求为止。这样做的好处是测点数较少, 维护工作量较小, 适宜于参数可测性较差的系统。但要使用计算机, 做到实时, 还有一定的困难。

经常通过两种方法的权衡和综合确定测试方法。考虑到液压系统的工作依靠压力的传递, 压力是各种状态信息的载体, 而脉动分量尤其敏感。选择压力脉动信号作为测试信号, 在故障模拟试验台上, 设置7个测点, 对9个状态进行诊断研究。通过比较将7个测点减少到1个测点, 并研究故障诊断有效性。发现压力脉动信号携带丰富的状态信息, 所选择的测点对全部9个状态都是可达的。目前, 正遵循同一思路, 设置1个测点, 对15个状态进行分类和诊断, 已取得良好效果。

3.2 故障特征的提取

传统的谱估计方法是利用FFT进行的。虽然计算效率高, 对各种类型信号都能得到较合理的结果, 但是由于分辨率受采样间隔的限制, 加窗会引起能量的泄漏和谱密度的畸变, 并使小信号淹没到大信号的旁瓣中, 而且谱估计量不是一致估计量。现代谱估计中以建立自回归谱应用最广。自回归模型的表达式为

$$X_n = - \sum_{m=1}^M a_{M,m} X_{n-m} + \varepsilon_n \quad (11)$$

其中 $a_{M,m}$ 是 M 阶AR过程的第 m 个参数, ε_n 是一个白噪声过程。经 z 变换

$$A(z) = \sum_{m=0}^p a_m z^{-m} \quad (12)$$

自回归模型AR(M)的时间序列谱

$$P_z(z) = \frac{\sigma^2}{A(z)A^*(z^{-1})} \quad (13)$$

σ^2 是 ε_n 的方差。

自回归模型参数、残差、数据中心距特征都携带有状态信息。经过诊断试验研究，模型参数效果相当好。实践还表明，模型阶次不必高到足以准确地估计出谱来，因为谱上的信息并不见得都与要求识别的故障有关。

AR(M)参数估计方法较多，我们采用Marple算法，这种算法是以向前、向后预测误差最小为目标的最小二乘估计。模型定阶除参考有关定阶准则外，尚需通过故障诊断有效性测度检验。

4 故障分类方法——模式识别技术的应用

模式识别利用计算机对物理现象进行分类，在误分类概率最小的条件下，使分类即识别的结果与实际相符。应用模式识别技术对系统各种状态（正常的和故障的）进行分类，以达到故障诊断的目的。模式识别的过程参见图1。

模式识别过程中采用样本统计特性者称为参数识别，不用统计特性，而用距离等概念者，称为非参数识别。

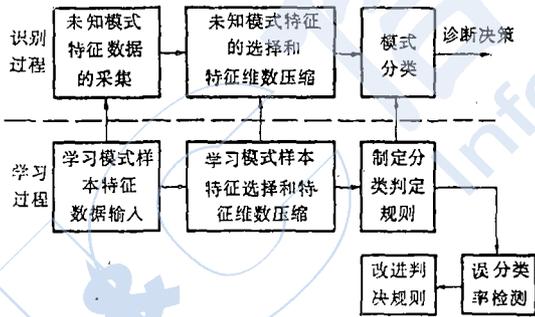


图1 模式识别过程

4.1 采用的识别方法

假设模式（或状态）的特征向量为 x ，共有 m 个模式待识别，第 i 模式 ω_i 有 N_i 个学习样本， $i = 1, 2, \dots, m$ 。

4.1.1 线性判定函数方法

设想在特征空间中以一组超平面将各模式分开。线性判定函数为

$$d_k(x) = \{w_k\}^T \{x\} \quad (14)$$

其中 $\{w_k\} = \{w_{k1}, w_{k2}, \dots, w_{k, M+1}\}$

$$\{x\} = \{x_1, x_2, \dots, x_M, 1\}$$

$\{w_k\}$ 为权向量， $\{x\}$ 为增广特征向量， M 为特征向量的维数， ω_i 为第 i 个模式。如对所有 $i(i \neq k)$ ，都有 $d_k(x) \geq d_i(x)$ ，则 $x \in \omega_k$ ，分割特征空间的超平面为

$$d_i(x) - d_j(x) = 0, i \neq j, i, j = 1, 2, \dots, m, \quad (15)$$

如 m 个模式线性可分，则存在 $d_i(x)$ ，使误分类率为零。

采用Perceptron算法求解(15)，使指标函数

$$J_P(w) = \sum_{\substack{X: P \\ X: \omega_k}} \sum_{\substack{j: k \\ j \neq k}} -[d_k(x) - d_j(x)] \quad (16)$$

最小。式中 P 是用 w 进行分类时，误分类的样本集合， ω_k 是第 k 个模式， Q 是使 x 误分类的判定函数 w_i 的集合。

4.1.2 似然比距离方法

首先建立时间序列 $X = (x_1, x_2, \dots, x_M)$ 与AR(M)间的距离测度。如用 S 表示 ε_n 均方值，并记 $\{\theta\} = \{s, a_1, a_2, \dots, a_M\}$ ， $\{a\} = \{1, a_1,$

$$a_2, \dots, a_M\}$$
， $V_i = \frac{1}{N-M} \sum_{n=1}^{N-M} x_n x_{n+i}$ ，则在 $\{a\}$

已知和未知时的似然比正比于

$$d(\{X\}/\{a\}) = \ln(\{\hat{a}\}^T \{v\} \{a\} / \{\hat{a}\}^T \{v\} \{\hat{a}\}) \quad (17)$$

其中二次型 $\{a\}^T \{v\} \{a\}$ 是时间序列经过线性预测模型 $\{a\}$ 的残差， $\{\hat{a}\}^T \{v\} \{\hat{a}\}$ 是经过线性预测模型 $\{\hat{a}\}$ 的残差。(17)式的谱意义为

$$d(\{x\}/\{a\}) = \ln(1 +$$

$$\int_{-\pi}^{\pi} \frac{|A(e^{i\theta}) - \hat{A}(e^{i\theta})|^2}{|\hat{A}(e^{i\theta})|^2} d\theta] \quad (18)$$

如 $\{a\}$ 与 x 的模型 $\{\hat{a}\}$ 相近，则 $d(\{x\}/\{a\})$ 很小，反之，则较大。 $d(\{x\}/\{a\})$ 是伪距离。

如估计出系统各种模式的AR模型参数，则可通过由似然比建立起的伪距离加以分类。每取得一个新的记录 x ，可求得各学习样本与 x

的距离 $d(\{x\}/\{a_{ij}\})$ ，并将 x 归入与之距离最小的模式中。 $\{a_{ij}\}$ 表示第 i 模式的第 j 样本。

4.1.3 倒谱距方法

如有两个AR模型，谱的对数分别为 $\ln(\sigma^2/|A(e^{j\theta})|^2)$ 和 $\ln(\sigma'^2/|A'(e^{j\theta})|^2)$ ，设

$$d = \int_{-\pi}^{\pi} \{\ln(\sigma^2/|A(e^{j\theta})|^2) - \ln(\sigma'^2/|A'(e^{j\theta})|^2)\} d\theta \quad (19)$$

则 d 表示两个谱的差别，设 $A(z)$ 是 z^{-1} 的 P 阶多项式，根在单位圆内，且 $A(\infty)=1$ ，则对 $\ln[A(z)]$ 作泰勒级数展开得

$$\ln[A(z)] = - \sum_{k=1}^{\infty} C_k z^{-k} \quad (20)$$

C_k 称倒谱系数，只取 l 项，在实际应用中即可，并表示为

$$U(l) = (C_0 - C_0')^2 + 2 \sum_{k=1}^l (C_k - C_k')^2 \quad (20)$$

$U(l)$ 是倒谱系数差的测度，称为倒谱距。算出各模式的倒谱系数，并用其均值作为各模式的模板，取自学习样本的 x ，将归入到 $U(l)$ 最小的那一种模式中去。

4.2 故障诊断过程

故障诊断过程是在参考模式已经取得的情况下，对待判别模式的分类或识别的过程，参见图2。

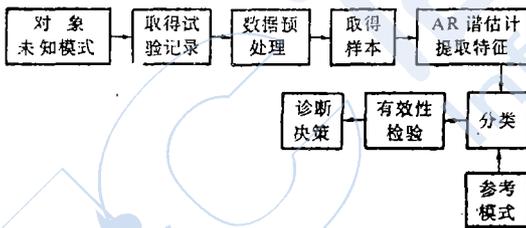


图2 故障诊断过程

5 故障诊断试验研究结果

5.1 故障诊断方法的有效性试验结果

我们在齿轮泵-节流负载构成的泵源系统上设置了压力传感器，以引出压力脉动信号。为了检查测点数量及位置、样本容量、模型阶数、分类方法的效果，进行了有效性试验。人为设置了9种状态，包括简单故障和复合故障：

- 5.1.1 正常状态
- 5.1.2 蓄压器切出
- 5.1.3 进油压力过低（形成真空、下同）
- 5.1.4 蓄压器切出，进油压力过低
- 5.1.5 油滤短路
- 5.1.6 油滤短路，进油压力过低
- 5.1.7 油滤短路，进油压力过低，蓄压器切出
- 5.1.8 油滤短路，蓄压器切出
- 5.1.9 安全活门弹簧调定压力变低

表2是故障模拟试验的部分结果。

表2 故障诊断方法有效性试验结果

模型阶数	指标要求	泵后			滤前		
		线性断 定函数	似然比 距离	倒谱距	线性判 定函数	似然比 距离	倒谱距
M=10	N	50	50	50	95	95	76
	P_{c1}	0.9500	0.8933	0.9222	0.9965	0.9988	1.0000
	$\prod P_{c2i}$	0.6235	0.3467	0.4520	0.9686	0.9895	1.0000
	P_L	0.0028	0.0130	0.0067	0.0000	0.0000	0.0000
M=20	N	40	40	40	76	95	76
	P_{c1}	0.9861	0.9556	0.9694	1.0000	0.9780	1.0000
	$\prod P_{c2i}$	0.8788	0.6577	0.7469	1.0000	0.8051	1.0
	P_L	0.0000	0.0083	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
M=30	N	40	40	40	63	40	60
	P_{c1}	1.0000	0.9833	0.9889	0.9982	0.9861	1.0000
	$\prod P_{c2i}$	1.0000	0.8573	0.9019	0.9841	0.8750	1.0000
	P_L	0.0000	0.0056	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
M=40	N	33	33	33	63	63	63
	P_{c1}	1.0000	0.9966	1.0000	1.0000	0.9912	1.0000
	$\prod P_{c2i}$	1.0000	0.9697	1.0000	1.0000	0.9206	1.0000
	P_L	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

5.2 故障诊断试验结果

在泵源故障模拟试验台上，设置了七种状态部份状态参数变化范围较大，以检验诊断方法的适应能力。同样除简单故障外，也设置了复合故障。这些状态是：

- 5.2.1 正常状态（工作压力60—100公斤/公分²，蓄压器预充压力44—65公斤/公分²）
- 5.2.2 蓄压器切出状态
- 5.2.3 蓄压器充气压力不足（0—30公斤/公分²）
- 5.2.4 进油阻力大（-0.05—-0.85公斤/公分²）

5.2.5 齿轮泵密封失效,外漏呈滴状

5.2.6 齿轮泵外漏、蓄压器切出

选择装在泵后的压力传感器引出的压力脉动信号,对6个状态共取18个试验记录,以0.4ms间隔采样。每200个点建立一个AR模型。模型阶数取20。对取自同一状态的样本,按欧几里德距离最小的点进行凝聚,一共形成300个学习样本。采用300个样本同时投入学习过程的方法,用线性判别函数方法,取得诊断结果如表3所示。系统的确诊率92%,虚警率1.67%,漏警率1.67%,误诊率4.66%。

6 结论

本文结合液压系统特点和对故障诊断的技术要求,形成一种液压系统故障诊断与辨识的方法,要点是:

- 6.1 对故障诊断技术要求进行量化
- 6.2 从压力脉动信号中提取状态信息
- 6.3 采用现代谱估计技术,以自回归模型参数作为故障特征
- 6.4 用模式识别技术对简单及复合故障进行分类

通过泵源系统故障模拟试验研究表明这种方法对于测点少、状态较多的参数变化范围又较大的情况,仍能取得较好效果。根据阶段研究结果,在取得参考模式后,对一个未知状态的诊断大约需时2分钟,表明具有良好的应用前景。

参与本课题工作的有王进华、范启富、赵忠尧、韩英桃、郑永安等同志。本文是根据1988年4月底前的阶段工作撰写的报告。

表3 6状态诊断结果

实际状态 诊断状态	1	2	3	4	5	6
1	45	2	1	1	1	0
2	0	47	3	0	0	0
3	4	0	43	3	0	0
4	1	3	0	46	0	0
5	0	0	0	0	48	2
6	0	0	0	0	3	47

参 考 文 献

- 1 屈梁生,何正嘉.机械故障诊断学.上海,科学技术出版社,1986
- 2 陈尚勤,魏鸿钧.模式识别.人民邮电出版社,1984
- 3 戴诗亮.随机振动试验技术.清华大学出版社,1984
- 4 Collacoft R A. Mechanical Fault Diagnosis and Condition Monitoring. Chapman an Hall, Ltd, 1977
- 5 Duzich J J. Hydraulic Diagnosis Monitoring System, AD-A077552
- 6 Fu K S. Application of Pattern Recognition. CRC Press INC, 1982
- 7 Preot P H. Selection of Pressure Transducers for Hydraulic Systems, I Mech E Conf, 1978, 8:69-82
- 8 Hunt T M, Barker D J, Preot P H. The Utilization of a Micro-Computer in The Condition Monitoring of a Hydraulic Pump, I Mech E Conf 1984, 8
- 9 Jones G A. Condition of Hydraulic System Using a Portable Microcomputer, I Mech E Conf 1984, 8

HYDRAULIC SYSTEM FAULT RECOGNITION AND FAULT DIAGNOSIS

TONG Xin

(Northwestern Polytechnical Univ, Laboratory 901)

ABSTRACT

In this paper we try to creat a method to diagnose and recognize the fault in a hydraulic system in accordance with different technical requirements and features of the system. The method is implemented by means of extracting fault information from pressure ripple, utilizing the autoregressive model parameters as the fault feature, and then using pattern recognition to classify what a fault pattern is existing.

We have completed experimental study on the fault diagnosis of a pump system. The principle of this method is correct and the method is quite practical.

Keywords: hydraulic system, pressure ripple, fault feature, pattern recognition, fault diagnosis, fault recognition