

# HMM 在潜在电子故障识别及状态评估中的应用

郝学良, 黄景德

(海军大连舰艇学院 舰炮火控教研室, 大连 116018)

**摘要:**应用 HMM(hidden markov model)故障诊断原理对多状态系统的故障模式进行了识别,在此基础上利用多状态系统可靠性分析对 HMM 模型进行修正,进一步运用 Viterbi 算法求得最优状态序列,实现对系统所处故障模式的状态进行评估,并进行了实验验证。结果表明,该方法能够较好解决多状态电子系统的故障模式识别问题,并能对系统所处的失效状态进行有效评估。

**关键词:**隐马尔可夫模型;多状态可靠性分析;状态评估

**中图分类号:**TP277

**文献标识码:**A

**文章编号:**1006-0707(2011)06-0092-02

随着科学技术的快速发展,现代电子装备的结构越来越复杂,功能越来越完善,自动化程度也越来越高。装备的不同结构之间互相关联,紧密耦合,使得复杂装备的故障特征具有不确定性、非线性和并发性,一旦发生故障,不仅会造成重大的经济损失,而且可能危及人身安全,造成环境污染,带来严重的社会问题。这就要求进一步提高装备系统的安全性,确保装备安全、可靠地运行。工程实践中,大部分电子产品的失效机理最终可以追溯到产品潜在的性能退化过程,从某种意义上说可以认为性能退化最终导致了失效(或故障)的出现,因此,可以利用给定应力下的退化轨迹外推出产品的失效数据,而后使用这些数据来对产品建立失效模型<sup>[1]</sup>。本文利用 HMM 较强的模式识别能力对系统加速实验获得的失效数据建立失效模式模型库,利用该模型库可实现对系统的实时监测和状态评估,对提高电子装备动态监控水平有着重要的理论意义和工程实用价值。

## 1 故障模式分析

假设某系统具有  $m$  种故障模式,如短路、开路、击穿、断裂等,记为  $X = \{x_i\}, i = 1, 2, \dots, m$ 。每种故障模式具有  $n$  个状态,如安全、安全、轻微劣化、严重劣化、潜在故障、故障等,记为  $S = \{s_i\}, i = 1, 2, \dots, n$ 。由于复杂电子装备的故障具有不确定性、非线性、并发性等特征,可假设每种故障模式状态的转移假设服从马尔可夫过程,那么接下来有 2 个问题需要解决:

1) 系统所处的失效模式。关于这个问题,可以利用 HMM 强大的模式识别能力来解决。上面已经假设各个模式的失效过程中的状态转移服从马尔可夫过程,可对每种故障模式  $x_i$ , 设置一个 HMM 模型  $\lambda_i$ , 然后针对  $x_i$  设置加速应力实验得到多组失效数据,参照产品的失效标准确定性特征参数的分区向量和码本向量,并采用 Matlab 编程对性能特征

参数进行矢量化处理。利用这些数据对 HMM 模型  $\lambda_i$  进行训练,即得到一种故障模式模型,再利用这观测数据训练相对于该故障模式的 HMM 模型(Baum-welch 算法)  $\lambda_i, i = 1, 2, \dots, n$ 。得到  $n$  个 HMM 模型存入模型库备用。某故障模式  $\lambda_i$  的状态转移图如图 1 所示,其中:圆圈表示隐状态;有向弧表示状态的转移<sup>[2]</sup>。

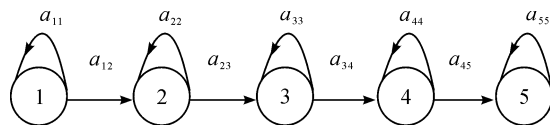


图 1 用于故障模式识别的 HMM

2) 系统所处的状态。对于多状态系统而言,当系统处于潜在故障状态时并不会出现明显故障征兆,但是系统的性能已经出现退化,而且随时都有可能发生故障。为了避免因发生故障导致损失和危害,此时,就需要对系统所处的状态进行确切评估。识别出故障模式后,下一步需要对系统故障模式所处状态进行评估,从而决定是否进行提前维修。

## 2 故障模式识别与状态评估

### 2.1 故障模式识别

在故障模式识别时,首先要对待识别的系统运行数据在观测周期进行采样,参照产品的失效标准确定性特征参数的分区向量和码本向量,并采用 Matlab 编程对性能特征参数进行矢量化处理,采集得到  $T$  组观测数据  $O$ , 然后计算观察值序列与故障模型库中各个故障模式的 HMM 模型相似的或然概率,即输出概率  $P(O|\lambda_i)$ , 取输出概率最大的 HMM 模型所对应的故障模式为识别出的故障模式。或然率的计算可以通过前向算法来实现。如果  $P(O|\lambda_i), i \in (1, 2, \dots, X)$  在  $P(O|\lambda_i)(i = 1, 2, \dots, X)$  中最大,那么  $\lambda_i$  就

是与待识别故障最接近的故障 HMM 模型。形式化定义为:

$$\lambda_i = \arg \max(P(o | \lambda_i)) \quad (1)$$

### 2.2 故障状态评估

#### 2.2.1 状态变迁过程描述

装备发生故障过程实质上是一个状态变迁过程,即从正常状态开始,经过一系列劣化状态,最终达到故障状态。本文已提到可用  $S = \{s_i\}, i = 1, 2, \dots, n$ 。表示装备性能劣化失效状态空间,是由于复杂电子设备潜在故障的不确定性,对于状态的监测很难通过直接观测值实现,也就是装备的运行状态是隐藏的,对于这种隐藏状态的评估只能通过观察值来推算。图 2 给出了装备性能劣化失效的状态变迁及与观测序列对应的网络结构。在不考虑维修的情况下,装备性能劣化过程是不可逆的,每个状态只能向其右侧更高编号的状态转移,同时每个状态也可以向自身转移<sup>[4]</sup>。

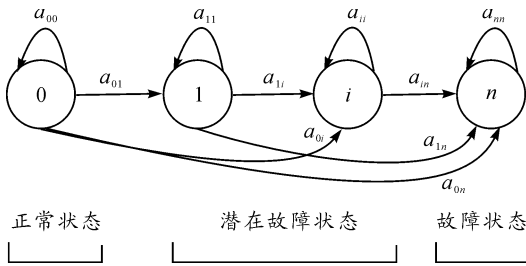


图 2 状态变迁拓扑结构

#### 2.2.2 多状态可靠性分析修正后的 HMM 模型

Viterbi 算法解决了给定一个观察值序列  $O = \{o_1, o_2, \dots, o_T\}$  和一个模型  $\lambda_i$ , 在最佳意义上确定一个状态序列  $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_T\}$  的问题。但是由于 HMM 初始模型的选取对模型训练结果的影响较大,而评估故障模式所在状态又是一个对灵敏度要求较高的问题,因此采取利用多状态可靠性分析先对系统预先进行可靠性评估。

对于第  $i$  个部件,历史样本记为  $X = (x_0, x_1, x_2)$ ,  $x_0, x_1, x_2$  分别表示历史样本的失效、中介、安全数目;现场样本记为  $X' = (x'_0, x'_1, x'_2)$ ,  $x'_0, x'_1, x'_2$  分别表示现场样本的失效、中介、安全数目。

假定样本与历史样本分别来自 2 个不同的总体,为了尽量减少历史样本与样本异总体对可靠性评定的影响,同时又充分利用历史样本中的信息,引入了混合先验<sup>[3]</sup>:

$$\pi_\rho(p_{i0}) = \rho \text{Beta}(x_0, x_1 + x_2) + (1 - \rho) \quad (2)$$

$$0 \leq \rho \leq 1$$

在取得现场样本  $Y' = (x'_0, x'_1 + x'_2)$  后,就可导出后验密度为

$$\pi_\rho(p_{i0} | x) = \frac{M \text{Beta}(x'_0 + 1, x'_1 + x'_2 + 1) + N \text{Beta}(x'_0 + x_0, x'_1 + x'_2 + x_1 + x_2)}{M + N} \quad (3)$$

其中:

$$M = (1 - \rho) \beta(x_0, x_1 + x_2) \beta(x'_0 + 1, x'_1 + x'_2 + 1) \quad (4)$$

$$N = \rho \beta(x'_0 + x_0, x'_1 + x'_2 + x_1 + x_2) \quad (5)$$

这里,  $\beta(a, b) = \Gamma(a) \Gamma(b) / \Gamma(a + b)$  是贝塔函数。

对于可靠性评定问题,给定置信度  $\gamma$  后,可靠性下限  $p_{i0L}$  从式(6)解出:

$$\int_{p_{i0L}}^1 \pi_\rho(p_{i0} | x) = \gamma \quad (6)$$

接下来利用上述可靠性分法对系统进行预先评估可得到初始状态概率,将初次评估的结果作为初始模型对 HMM 的训练进行修正,得到更加准确的 HMM 模型  $\lambda_i$ ,将观察序列  $O$  代入模型,利用 Viterbi 算法解决模型的最优状态序列问题,再根据该状态序列识别出故障状态。

## 3 实例

以某雷达天控系统为例进行验证,已知其常见故障模式如表 1 所示。

表 1 某雷达天控系统常见故障模式

序号	故障模式	序号	故障模式
1	无法开机	10	无法切换
2	无法关机	11	指示错误
3	动作错误	12	机械磨损
4	短路	13	击穿
5	开路	14	氧化
6	输入超限	15	断裂
7	输出超限	16	变形
8	无输入	17	其他
9	无输出	18	

针对各种故障模式进行加速实验,每种故障模式进行 10 组实验,将得到共 170 组数据进行矢量化后,再进行对应于该故障模式的 HMM 训练,另外用每种故障模式各 3 组共 51 组数据进行识别,结果共有 10 组数据误识,识别率达到 94%。对于成功识别的故障模式进行故障状态评估,得到某状态序列如图 3 所示,从图中看出 20 h 后系统处于故障状态。

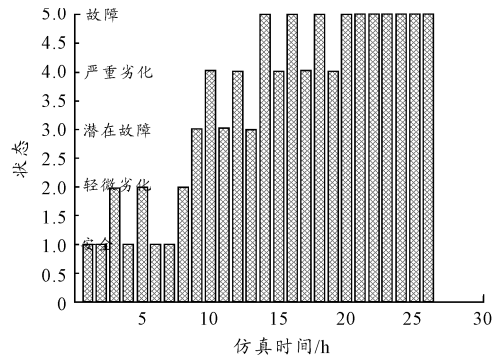


图 3 故障模式状态序列评估仿真

## 4 结束语

本文给出了一种基于 HMM 模型的潜在(下转第 125 页)