

文章编号: 1001-2486(2007)04-0100-05

## 基于 TSMD-SVM-HMM 的机内测试智能降虚警方法\*

刘冠军<sup>1</sup>, 徐 哲<sup>2</sup>, 邱 静<sup>1</sup>, 吕克洪<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073; 2. 陆航研究所, 北京 101121)

**摘 要:**机内测试虚警问题是影响系统完好性和使用保障费用的重要因素。针对环境因素导致的虚警问题, 设计了时间环境应力测量装置, 应用支持向量机的小样本学习优点, 建立虚警与环境因素的关联关系, 应用隐马尔可夫模型的连续动态信号处理能力, 描述系统长期工作历程中虚警的发生规律, 提出了基于时间环境应力测量装置-支持向量机-隐马尔可夫模型的机内测试智能降虚警方法。最后, 在某型直升机航向姿态系统上进行了应用与验证, 试验结果表明: 该方法有效识别出了机内测试的虚警。

**关键词:**机内测试; 虚警; 时间环境应力测量装置; 支持向量机; 隐马尔可夫模型

**中图分类号:** TP277 **文献标识码:** A

## Intelligent Method of Reducing False Alarm in Built-in Test Based on Time Stress Measurement Device-support Vector Machine-hidden Markov Model

LIU Guan-jun<sup>1</sup>, XU Zhe<sup>2</sup>, QIU Jing<sup>1</sup>, LV Ke-hong<sup>1</sup>

(1. College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Aviation Research Institute, Beijing 101121, China)

**Abstract:** False alarm of Built-in Test (BIT) has important influence on system readiness and usage cost. Aimed at solving the problem of false alarm caused by environmental factors, a Time Stress Measurement Device (TSMD) was designed to sample the temperature and vibration of the system. The relationship between false alarm and environmental factors was built based on Support Vector Machine (SVM) which has the advantage of small sample learning. The occurring rule of false alarm was described by using Hidden Markov Model (HMM) which can process dynamic sequential signal well. Then, an intelligent method of reducing false alarm was proposed in terms of TSMD-SVM-HMM. Finally, the method was applied and validated on a helicopter heading attitude system. The experimental results show that the method can effectively recognize and reduce false alarms caused by environmental factors.

**Key words:** built-in test; false alarm; time stress measurement device; support vector machine; hidden markov model

机内测试 (Built-in Test, BIT) 是系统或设备自身为故障检测、隔离或诊断提供的自动测试能力。它是能显著改善系统测试性与诊断能力的重要技术手段, 在装备特别是航空电子设备的可靠性、维修性、测试性设计中日益受到重视<sup>[1]</sup>。

虚警是机内测试或其他检测模块指示有故障而实际上不存在故障的现象。虚警率较高始终是制约 BIT 技术研究和应用的瓶颈问题之一, 成为导致武器系统战备完好性差、使用保障费用高的重要因素。国内外研究表明, 温度、振动等环境应力是造成 BIT 虚警的主要原因之一<sup>[1-2]</sup>。美国研究机构针对该原因, 设计了时间环境应力测试装置 (Time Stress Measurement Device, TSMD), 应用神经网络技术, 提出了神经网络虚警过滤器, 降低了环境应力产生的虚警<sup>[2]</sup>。但该方法一般需要较多的训练样本, 而虚警是一种偶发的现象, 大量的虚警数据往往难以获得, 这成为基于神经网络的降虚警方法应用的瓶颈。而且, 基于神经网络的降虚警方法未能有效地利用设备的历史信息, 不能有效地描述虚警的长期规律, 这也是该方法的不足之一。

\* 收稿日期: 2007-02-10

基金项目: 国家部委资助项目

作者简介: 刘冠军 (1972—), 男, 副研究员, 博士。

支持向量机(Support Vector Machine, SVM)是近年来发展起来的一种机器学习方法。与神经网络相比, SVM 不仅在训练样本数较小的情况下能够达到较好的分类能力,而且具有泛化能力强、模型依赖性低等优点。SVM 现已成为机器学习和数据挖掘领域的有效技术工具<sup>[3-4]</sup>,比较适合在样本较少的条件下建立虚警与环境因素的关联关系,进行正常、虚警、故障等状态的分类。

隐马尔可夫模型(Hidden Markov Model, HMM)是在 Markov 模型的基础上发展起来的统计模型<sup>[5]</sup>。HMM 具有强大的处理连续动态信号的能力,非常适合动态时间序列的建模。并且, HMM 具有较强的学习机制和分类能力,通过 HMM 建模,可从训练样本中获取信息,建立历史数据之间内在的关系,将隐含的规律转化为实际的模型参数,有效地利用历史信息,并根据相似性比较识别未知样本的类别。HMM 现已成为故障诊断和预测的有效手段,比较适合描述虚警的发生规律,进行虚警的识别。

## 1 基于 TSMD-SVM-HMM 的降虚警方法

BIT 中,造成虚警的原因很多,如环境因素影响、设计者的假设不当、诊断设计不适于系统的实际情况、测试门限值/容差不合理等。国内外的装备 BIT 研究和应用实践分析表明,在诸多导致虚警的因素中振动、温度占重要地位,是导致虚警的主要因素之一<sup>[2]</sup>。针对该原因,本文综合应用 TSMD、SVM、HMM 技术,提出基于 TSMD-SVM-HMM 的智能降虚警方法,其基本原理如图 1 所示。

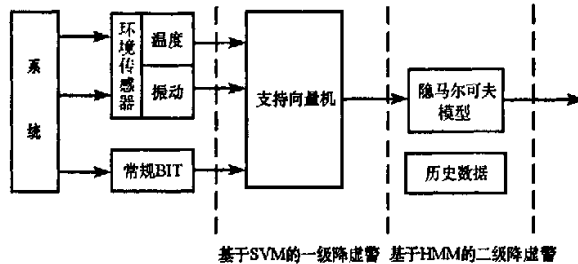


图 1 基于 TSMD-SVM-HMM 的智能降虚警方法

Fig.1 Intelligent method of reducing false alarm based on TSMD-SVM-HMM

### 1.1 基于 SVM 的一级降虚警

首先在系统中设计嵌入温度、振动等环境传感器以及环境数据采集、记录与分析装置,构成 TSMD,它实时记录系统运行过程中的环境应力,为降低环境因素导致的虚警提供了充足的基础信息。然后,采用系统及其 BIT 实际工作和试验过程中得到的环境和虚警数据,对 SVM 进行训练,应用 SVM 关联环境信息,可在有限的虚警样本条件下,通过 SVM 建立虚警和环境因素的关联关系。当 BIT 工作时,常规 BIT 结果及环境应力测量模块测量的振动和温度信息送入 SVM 进行决策,这样就由常规 BIT 的简单决策,拓展为根据 BIT 输出和温度、振动等环境信息进行智能决策,从而识别出系统处于真正的故障状态还是由于环境因素导致的虚警,如果是虚警,则给予记录而不进行故障报警。

SVM 的基本思想为:选择适当的非线性变换映射,将线性不可分的两类样本映射到某个高维的特征空间,使得在目标高维空间中线性可分,并寻找一个最优超平面,该平面不仅能将两类样本正确分开,而且到两类样本中最近样本(即支持向量)的距离最大<sup>[3-4]</sup>。高维空间的维数一般较高, SVM 巧妙地应用核函数,不仅将样本映射到了高维空间,同时计算复杂度较低。

为分别识别温度、振动等环境因素导致的虚警,本文设计两个并联的 SVM 分类器分别进行识别。其中, SVM1 识别由温度造成的虚警, SVM2 识别由振动造成的虚警,再根据二者的结果进行综合判断。由于待测试系统包括三种决策类别:正常状态、虚警和硬故障,而 SVM 理论是针对二类模式识别问题而提出的,不能直接用于多类分类。为正确区分三种状态, SVM1 和 SVM2 都由两个两类分类器构成,分别包括正常类 SVM、虚警类 SVM 两类分类器,依次用两类 SVM 分类器将正常、虚警和硬故障区别开。基于 SVM 的一级降虚警原理如图 2 所示。

表1 SVM 判决规则  
Tab.1 The judgment rule of SVM  
(0 正常, 1 虚警, 2 硬故障)

SVM1 结果	SVM2 结果	综合决策结果
2	2	2
2	1	1
1	2	1
1	1	1
1	0	1
0	1	1
0	0	0

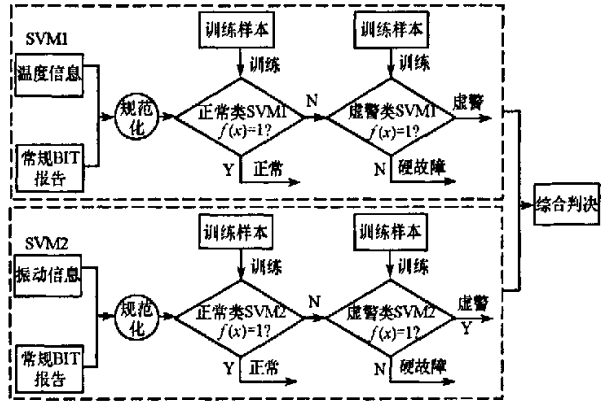


图2 基于 SVM 的一级降虚警方法

Fig.2 The method of reducing false alarm based on SVM

采用被测系统实际工作和试验过

程中得到的环境和虚警数据,对 SVM1 和 SVM2 里的正常 SVM 和虚警类 SVM 进行训练,分别建立虚警与温度、虚警与振动的关联关系。降虚警过程中,将常规 BIT 结果、环境信息经规范化后送入相应的 SVM, SVM 分类判断处于正常、虚警或硬故障状态。然后,根据 SVM1 和 SVM2 的分类结果进行综合判决,判决规则如表 1 所示。当 SVM1 和 SVM2 中任一个判断结果为虚警时,综合判决为虚警;当 SVM1 和 SVM2 都判断为硬故障时,综合判决为硬故障;当 SVM1 和 SVM2 都诊断为正常时,综合判决为正常。

1.2 基于 HMM 的二级降虚警

基于 SVM 的降虚警方法将环境信息与诊断结果关联起来,可降低由环境引起的虚警。但 SVM 只是利用了单个时间点的信息,而系统状态是一种动态过程时间序列。基于 SVM 的降虚警方法可以识别出系统某时刻与环境有关的虚警,但这种割裂前后联系而独立决策的方式具有一定的局限性,需要进一步放在时间序列中进行进一步判断。并且, SVM 的状态识别方法利用的主要是环境信息,其他重要数据、知识(如设备性能数据、设备历史故障记录等)并没有被有效利用。因此在基于 SVM 的一级降虚警的基础上,将 SVM 的决策结果与历史数据结合,通过 HMM 建模,利用其卓越的过程建模能力,通过系统分析和数据训练,描述系统及其 BIT 长期工作过程中虚警的发生规律,建立虚警间隐含的关联关系,在 SVM 一级降虚警决策的基础上进行二级决策,从而更准确地识别虚警。

为判断正常、虚警和硬故障等三状态,建立一阶三状态 HMM<sup>[8]</sup>,如图 3 所示。其中,状态 0 表示正常状态,状态 1 表示虚警,状态 2 表示硬故障,初始概率分布向量为  $\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_N)$ 。  $A = [a_{ij}]$  为三种状态之间的转移概率矩阵,因为硬故障状态无法向其他状态转化,因此  $a_{20}$  和  $a_{21}$  为 0(图中省略)。  $t$  时刻系统的状态被判决为  $s_t, [s_t \in \{0, 1, 2\}]$ , 该判决结果即为  $t$  时刻 HMM 的观测值,在一段时间内产生的观测值序列表示为  $S = (s_1, s_2, \dots, s_T)$ 。  $B = [b_k]$  为观测值输出矩阵,表示在某一状态下判决为正常、虚警和故障的概率。称  $\lambda = (\mu, A, B)$  为 HMM 的参数集合,  $P(S|\lambda)$  即为在该参数集合下,产生可见序列  $S$  的概率<sup>[5-7]</sup>。

基于 HMM 的二级降虚警原理如图 4 所示。将历史数据中的正常、虚警和硬故障数据作为训练样本,应用 Baum-Welch 算法训练 HMM 模型<sup>[5]</sup>,该算法通过不断更新模型参数  $\lambda = (\mu, A, B)$ ,寻找在该训练样本下的最优参数,以此构造在相应状态下的 HMM 模型。这样历史数据对判决结果的影响就体现在模型参数上,训练后的模型参数描述了系统工作过程中虚警等行为的发生规律。判决时,将来自 SVM 的识别结果送入建好的 HMM 模型中,根据前向一后向算法计算该样本在不同状态的 HMM 模型下的  $P(S|\lambda)$ <sup>[5]</sup>,比较各  $P(S|\lambda)$  大小,最大的  $P(S|\lambda)$  所对应的 HMM 模型类型即是样本所属的类别。

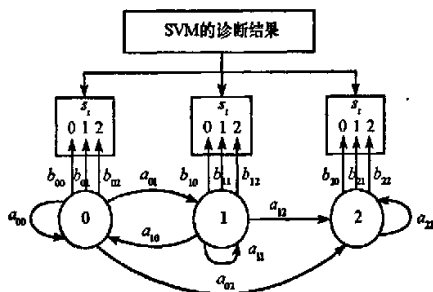


图3 HMM 模型  
Fig.3 Hidden markov model

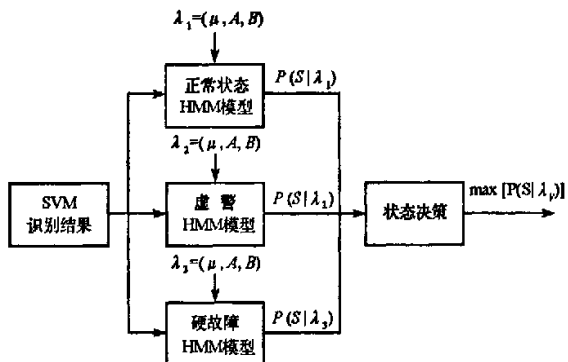


图4 基于 HMM 的二级降虚警方法  
Fig.4 The method of reducing false alarm based on HMM

## 2 试验验证及分析

为验证本方法的有效性,以某型直升机航向姿态系统为对象,开展了应用与试验研究。本文设计了温度和振动两种试验方法——利用温湿度箱进行的温度循环试验和在振动台上进行的随机振动试验,模拟系统在真实工作条件下受到的环境应力,激发 BIT 虚警。部分试验剖面与结果如图 5 所示。

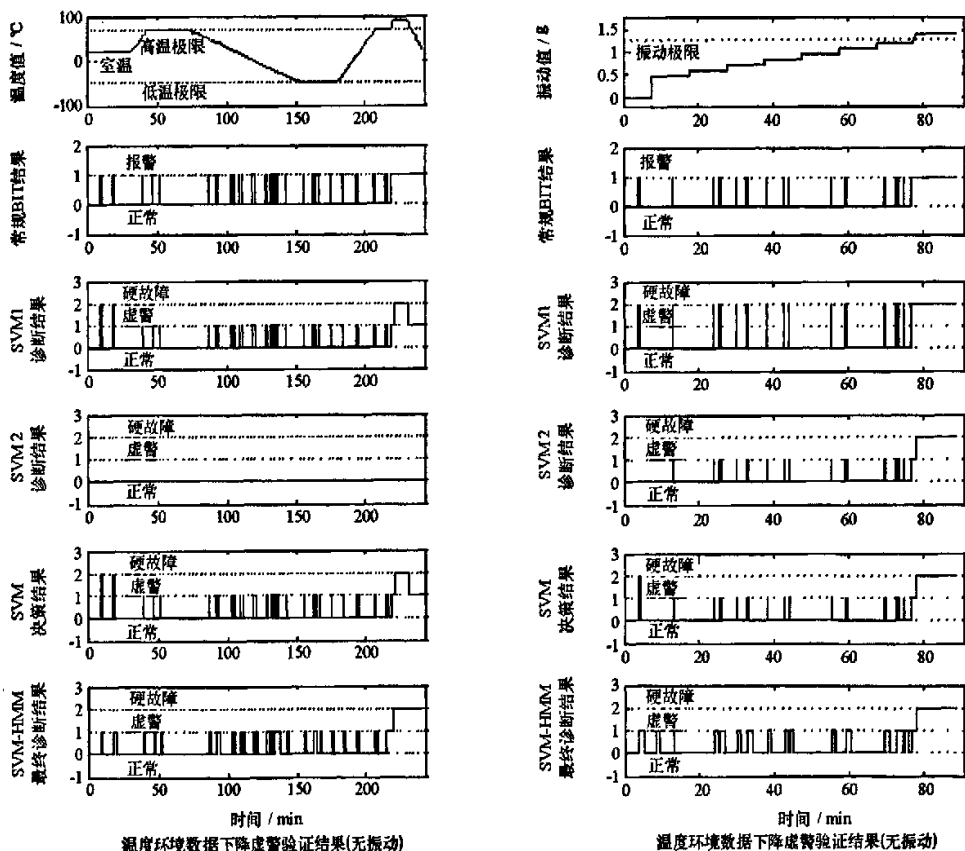


图5 试验验证结果

Fig.5 Experimental results

从图 5 中可以看出,当未进行温度循环(温度为室温)时,BIT 也出现个别的报警,这种报警经证实

为虚警,但这些虚警并不是由温度因素引起的;当温度在 $-50^{\circ}\text{C} \sim -70^{\circ}\text{C}$ 时,BIT会出现不连续的报警现象,测试表明这种报警为虚警;当温度低于 $-70^{\circ}\text{C}$ 之后,常规BIT始终报警,试验后测试结果表明系统发生了硬故障。图5的振动试验也具有相似的规律:当不加载振动时,出现的个别的报警是虚警,但不是由振动引起;当振动值小于 $1.2\text{g}$ 时,BIT出现不连续的报警,经测试表明这种报警为虚警;振动值超出 $1.2\text{g}$ 之后,出现了连续的报警,测试结果表明系统已经发生了硬故障。

试验验证中,将一部分上述环境数据和常规BIT输出数据作为模型的训练样本,一部分作为检验样本,综合收集的历史数据,验证本文提出的降虚警方法的有效性。基于SVM的一级降虚警识别了大部分虚警,但没有识别出正常环境下的虚警,经过基于HMM的二级降虚警后,虚警被较好地识别了出来,并具有良好的硬故障诊断能力。

### 3 结论

虚警率较高始终是制约BIT技术研究和应用的瓶颈问题之一。本文针对该问题,以某型直升机航向姿态系统为对象,通过系统内部设计的TSMD提供环境信息,综合SVM的小样本识别优点及HMM处理动态连续信号的能力,提出了基于TSMD-SVM-HMM的智能降虚警方法。试验验证结果表明,该方法有效地识别出了机内测试的虚警。

### 参考文献:

- [1] 温熙森,徐永成,易晓山,等. 智能机内测试理论与应用[M]. 长沙:国防工业出版社,2002.
- [2] Aylstock F. Neural Network False Alarm Filter[R]. ADA293097, 1995.
- [3] 王国胜,钟义信. 支持向量机的若干新进展[J]. 电子学报,2001,29(10).
- [4] 张学工. 关于统计学习理论与支持向量机[J]. 自动化学报,2000,26(1).
- [5] 谢锦辉. 隐 Markov 模型(HMM)及其在语音处理中的应用[M]. 武汉:华中理工大学出版社,1995.
- [6] 陈尚勤,罗承烈. 近代语音识别[M]. 成都:电子科技大学出版社,1991.
- [7] 蔡莲红,黄德智,蔡锐. 现代语音技术基础与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2003.
- [8] 柳新民,邱静,刘冠军. BIT系统的三态马尔可夫模型分析[J]. 国防科技大学学报,2004,26(1).
- [9] Gao R X, Suryavanshi A. BIT for Intelligent System Design and Condition Monitoring[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2002, 51(5).
- [10] Hsu C W, Lin C J. A Comparison of Methods for Multiclass Support Vector Machines[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2002, 13(2).



