

基于最优未知输入观测器的 BIT 降虚警技术*

姜云春,邱 静,刘冠军,钱彦岭

(国防科技大学 机电工程与自动化学院,湖南 长沙 410073)

摘要 :针对基于模型的机电控制系统 BIT 中的虚警问题,分析了系统中的信息不确定性和产生虚警的机理,基于最优未知输入观测器方法设计了 BIT 故障检测诊断系统,该系统对信息不确定性具有较强的鲁棒性,能够充分地抑制虚警。在某机电跟踪与稳定伺服平台 BIT 系统上进行了试验研究,结果表明机理分析正确,所提方法有效。

关键词 :BIT ;虚警 ;最优未知输入观测器 ;故障检测

中图分类号 :TN06 ;TP391 **文献标识码** :A

Decreasing False Alarm of the Built-in Test Based on Optimal Unknown Input Observer

JIANG Yun-chun, QIU Jing, LIU Guan-jun, QIAN Yan-ling

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

Abstract :The false alarm of the BIT based on model in the mechatronics control system is studied. Firstly, the information uncertainty of the BIT system and the reason of BIT false alarm are analyzed. Then, the BIT system is designed by the application of the optimal UIO(unknown input observer). It is robust to the information uncertainty, and can decrease the false alarm. Finally, the experimentation on the BIT system of stabilization and automatic pointing and tracking platform is made. The result shows that the analysis is correct and the method is effective.

Key words :BIT(built in test); false alarm; optimal IO(unknown input observer); fault detection

BIT(built-in test, 机内测试、内建测试)是指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。BIT 技术从 20 世纪 70 年代末开始应用于国外航空领域和武器装备系统中,在提高系统测试性、维修性和保障性方面发挥了重要作用,但同时也暴露出一些问题,其中较高的虚警尤为突出。虚警是指设备的 BIT 系统或其它监控系统指示有故障而实际上不存在故障的情况。它导致了可用性降低和全寿命周期费用提高,使得使用及维修人员对 BIT 逐步丧失信心,直接影响了 BIT 的应用与推广,严重制约了 BIT 技术更深入、更广泛的应用。如何抑制和降低虚警已经成为目前 BIT 技术的一个重点和难点问题,也开展了一定的研究工作^[1~4]。

机电控制系统是一类典型的机电设备,在各种装备中有大量应用。基于模型的方法充分利用自身的解析冗余,一般不需要增加新的硬件,与 BIT“机内测试”的思想和实现方式非常一致,因而得到了普遍的重视。本文针对基于模型的机电控制系统 BIT 中的虚警问题,从其模型和原理出发,分析了引发虚警的信息不确定性和产生虚警的机理,从而为抑制和降低 BIT 虚警提供了理论依据。之后基于最优未知输入观测器方法设计了 BIT 故障检测诊断系统,该系统对信息不确定性具有较强的鲁棒性,能够充分地抑制虚警。最后在某机电跟踪与稳定伺服平台 BIT 系统上进行了仿真试验研究。

1 基于模型的 BIT 虚警机理的分析

基于模型的 BIT 通过将被测试诊断对象的测量信息和由模型表达的系统信息进行比较,产生残差,

* 收稿日期 :2005 - 08 - 02

基金项目 :国家部委基金资助项目(41319040202)

作者简介 :姜云春(1972—),男,工程师,博士生。

对残差进行分析判断,实现故障的检测、诊断与隔离。在基于模型的 BIT 故障检测与诊断中,信息的不确定性是影响其结果的一个主要因素。

1.1 BIT 系统故障检测诊断信息中的不确定性因素

从 BIT 系统故障检测诊断信息来看,包括模型信息和测量信息两部分。

(1) 模型信息的不确定性

由于模型的简化和模型参数的变化,模型与实际系统之间总存在一定的差别。主要原因与形式有:

- 以低维模型代替高维模型;
- 以线性模型代替非线性模型;
- 模型参数只是对实际系统的一种近似,本身不可能绝对准确;
- 由于模型的变化造成模型与实际系统之间的差别,当实际系统的结构改变,参数变动(但非故障)造成原来比较准确的模型也发生变化,与实际系统不匹配。

(2) 测量信息的不确定性

当基于模型实施 BIT 时,BIT 系统的信息获取设备为原系统的输入、输出传感器。一方面,这些设备自身在测量原理上总存在误差,同时,随着时间的推移,其性能也会有所退化;另一方面,系统总会受到如负载扰动、热噪声、电噪声、机械噪声等各种扰动的影响,造成测量信息的不确定,表现为信号歧变、缺失及受到噪声干扰。

分析表明,上述模型信息中的不确定性的因素,如非线性、模型降阶、参数扰动等,可转化为系统中的未知输入,测量信息的不确定性可以通过白噪声来描述^[5]。这样,带有信息不确定性和故障的离散动态系统可统一表示为:

$$\begin{cases} x_{k+1} = A_k x_k + B_k u_k + E_k d_k + w_k + B_k f_k^a \\ y_k = C_k x_k + v_k + f_k^s \end{cases} \quad (1)$$

其中, $x_k \in R^n$ 是状态向量, $y_k \in R^m$ 是输出向量, $u_k \in R^r$ 是已知输入向量,噪声 w_k 、 v_k 为零均值,方差分别为 Q_k 、 R_k 的独立的高斯白噪声过程, $d_k \in R^q$ 未知输入向量, $f_k^a \in R^r$ 代表执行器故障, $f_k^s \in R^m$ 代表传感器故障, A_k 、 B_k 、 C_k 、 E_k 分别为适维常数矩阵。

1.2 基于模型的 BIT 虚警机理

基于模型的 BIT 的故障检测与诊断,基本包括两个阶段的工作,即(1)残差产生:利用一个适当的算法(或装置)对系统的输入输出进行处理获取残差信号(2)残差评价(诊断决策):通过一定的决策规则来判断故障是否发生或者给出故障发生的可能性。

对于系统(1),基于一般的伦伯格观测器、卡尔曼滤波器或等价空间方法产生残差,均难以完全同时消除未知输入和测量噪声的影响。对于这种受到信息不确定性影响的残差,在无故障时,残差可能大于阈值,造成虚警;反之,在有故障时,残差可能小于阈值,造成漏报。特别是对于机电或机械系统,其故障一般都有一个发生、发展的过程,在早期,故障表现和特征相对是微弱的,这样使得这些不确定性信息对故障检测的影响更为突出,虚警和漏报的问题更为严重。

特别地,对于故障检测为二元假设检验,故障发生与不发生的概率均为 $1/2$,残差服从高斯分布时的情况,设 μ_0 、 μ_1 分别为无故障和有故障情况下的残差均值, σ^2 为残差,则基于最小错误概率准则进行决策时的虚警率为 $P_{FA} = 1 - \Phi\left(\frac{\mu_1 - \mu_0}{2\sigma}\right) \chi \Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt$ 为标准正态分布 $N(0, 1)$ 的分布函数^[6]。

2 基于最优未知输入观测器生成残差的 BIT 降虚警方法

由以上的分析可知,虚警是由于 BIT 检测诊断受到了信息不确定性的影响造成的。如要抑制和降低虚警,可以采取相应措施,使得 BIT 检测诊断信息的不确定性减小,如采用更精确的模型,选择高质量的传感设备等,但这在实际中往往会受到很大的限制。更多的是从改进 BIT 故障检测诊断系统的残差

产生和诊断决策着手考虑问题。本文基于最优未知输入观测器生成残差,可以完全消除未知输入对残差的影响,同时使得无故障时残差的稳态方差最小,由1.2节的分析可知,这样的设计可以在同样条件下,使得BIT系统故障检测虚警率最小。

对于系统(1),基于最优未知输入观测器生成残差^[5,7,8]:

$$\begin{cases} z_{k+1} = F_{k+1}z_k + T_{k+1}B_k u_k + K_{k+1}y_k \\ \hat{x}_{k+1} = z_{k+1} + H_{k+1}y_{k+1} \\ r_k = y_k - \hat{y}_k \end{cases} \quad (2)$$

其中, $\hat{x}_k \in R^n$ 是估计的状态向量,状态估计误差为 $e_k = x_k - \hat{x}_k$,用于故障检测的残差为 $r_k = y_k - \hat{y}_k$ 。

设计故障检测观测器增益 $F_{k+1}, T_{k+1}, H_{k+1}, K_{k+1}$,满足以下各式:

$$H_{k+1} = E_k(C_{k+1}E_k)^+$$

其中 $(C_{k+1}E_k)^+$ 是 $C_{k+1}E_k$ 的左逆阵,可表示为:

$$\begin{aligned} (C_{k+1}E_k)^+ &= [(C_{k+1}E_k)^T C_{k+1}E_k]^{-1} (C_{k+1}E_k)^T \\ K_{k+1}^1 &= A_{k+1}^1 P_k C_k^T [C_k P_k C_k^T + R_k]^{-1} \end{aligned}$$

其中:

$$\begin{aligned} A_{k+1}^1 &= A_k - H_{k+1}C_{k+1}A_k, \quad T_{k+1} = I - H_{k+1}C_{k+1} \\ F_{k+1} &= A_k - H_{k+1}C_{k+1}A_k - K_{k+1}^1 C_k \\ K_{k+1}^2 &= F_{k+1}H_k, \quad K_{k+1} = K_{k+1}^1 + K_{k+1}^2 \\ P_{k+1} &= A_{k+1}^1 P_{k+1}^1 (A_{k+1}^1)^T + T_{k+1}Q_k T_{k+1}^T + H_{k+1}R_{k+1}H_{k+1}^T \end{aligned}$$

其中:

$$P_{k+1}^1 = P_k - K_{k+1}^1 C_k P_k (A_{k+1}^1)^T$$

则有残差关系式为:

$$e_k = F_k e_{k+1} + K_{k+1}^1 v_{k+1} - H_k v_k + T_k w_{k+1} + K_{k+1}^2 f_{k+1}^s - H_k f_k^s + T_k B_{k+1} f_{k+1}^u \quad (3)$$

可以证明,无故障时,残差具有统计特性^[5]:均值 $\epsilon(r_k) = 0$,方差 $W_k = C_k P_k C_k^T + R_k$ 最小。

可见,通过这样的残差设计,完全消除了未知输入对残差的影响,同时使得无故障时残差的稳态方差最小,从而在相同的检测率下,理论上可使得BIT系统故障检测虚警率最小。

3 应用实例

在某机电跟踪与稳定伺服平台BIT系统上进行了试验研究。图1为该系统的BIT总体结构设计框图,可实现对多个LRU(line replace unit,现场可更换单元)的测试与诊断。

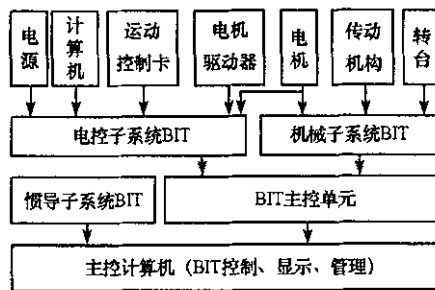


图1 机电跟踪与稳定伺服平台BIT系统总体结构

Fig.1 The structure of the BIT system of stabilization and automatic pointing and tracking platform

考虑系统的执行机构部分。取状态向量 $X = [i, \omega]$,观测向量 $Y = [i, \omega]$,其中, i 为电机驱动电流, ω 为转台角速度。注意到在建模过程中忽略了一些因素,如:齿轮传动中的非线性,模型参数不可能

绝对精确,阵风作用于天线所引起的负载扰动等;同时还存在由传感器自身和其它外界因素所造成的测量噪声。这些不确定的信息,可通过在状态方程、测量方程中加入未知输入和噪声来描述。最后建立形如(1)式的系统状态方程模型。

在试验中考虑了以下两种故障模式(1)电机电阻在数值上发生跳变(2)转台运动受到的粘性摩擦阻尼系数在数值上逐渐增大。基于以上的最优未知输入观测器生成残差 $r(k)$,并构建检验统计量 $\lambda(k) = r^T(k)W^{-1}(k)r(k)$ ($W(k)$ 为残差方差), $\lambda(k)$ 服从 χ_{m-1}^2 分布^[5]。图2、图3分别为相应的电机驱动电流 i 的残差检验统计量 $\lambda(k)$ 曲线,由图可以看出,通过设计一个简单的阈值,就能够实现对故障的准确检测,其中,对跳变型故障能够及时报警,对缓变型故障因为设置了较高的阈值,报警有约10步的延迟,两种情况的虚警率均几乎接近为零(在观测器的过渡阶段假设无故障发生,即在这一段残差统计量 $\lambda(k)$ 超过阈值不报警)。

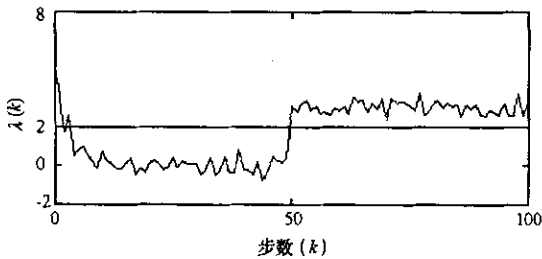


图2 故障1情况下的残差检验统计量 $\lambda(k)$
Fig.2 The residual test statistics in fault model 1

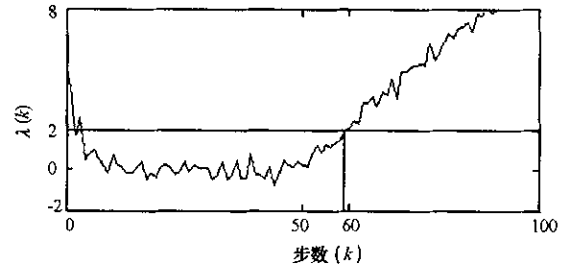


图3 故障2情况下的残差检验统计量 $\lambda(k)$
Fig.3 The residual test statistics in fault model 2

4 结 论

在基于模型的机电控制系统 BIT 中,信息不确定性是引发虚警的主要因素。基于最优未知输入观测器方法生成残差,能够完全消除由未知输入描述的模型信息不确定对残差的影响,最大限度地削弱由白噪声描述的测量信息不确定对残差的影响,无故障时残差的稳态方差最小,在相同的检测率下,理论上可使得 BIT 系统故障检测虚警率最小。

参 考 文 献:

- [1] Westervelt K. F/A - 18D(RC) Built-in-Test False Alarms[A]. IEEE Aerospace Conference Proceedings[C], 2002, 6: 2961 - 2970.
- [2] Rosenthal D, Wadell B C. Predicting and Eliminating Built-in Test False Alarms[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1995, 39(4): 500 - 505.
- [3] 温熙森,徐永成,等.智能机内测试理论与应用[M].北京:国防工业出版社,2002.
- [4] 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): 84 - 88.
- [5] Patton C J. Robust Model-Based Fault Diagnosis For Dynamic System[M]. Kluwer Academic Publishers. London, 1999.
- [6] 闻新,张洪钺,周露.控制系统的故障诊断和容错控制[M].北京:机械工业出版社,1998.
- [7] 李振营,沈毅,胡恒章.具有未知输入干扰的观测器设计[J].航空学报,2000, 21(5): 471 - 473.
- [8] Demetriou M A. UIO for Fault Detection in Vector Second Order Systems[A]. American Control Conference[C], 2001, 6: 1121 - 1126.

