

文章编号: 1008-0171(2004) 03-0018-05

传感器故障诊断方法研究

许秀玲,汪晓东

(浙江师范大学 信息科学与工程学院,浙江 金华 321004)

摘要: 传感器故障诊断是当今研究的热点领域。本文采用理论推导的方法详细介绍了基于模型的传感器故障诊断方法: 卡尔曼滤波法、多重假设检验等方法;也介绍了不基于数学模型的传感器故障诊断方法: 表决法、神经网络法等,并对模型法和神经网络两类故障诊断方法的优缺点进行了分析和对比;最后,还分析了现有故障诊断方法的发展趋势。

关键词: 传感器;故障诊断;卡尔曼滤波器;神经网络

中图分类号: TP212 文献标识码: A

传感器是任何测控系统中不可缺少的部件,也是最容易发生故障的环节之一。而且多数传感器的安装部位十分特殊,仅通过人力去发现和修复传感器故障很难做到及时有效。传感器故障诊断技术主要有硬件冗余和解析冗余两种方法,硬件冗余不需要被控对象的精确数学模型,鲁棒性强,但设备的结构复杂,致使体积、重量、成本增加。解析冗余的方法则是利用计算机的快速集中处理能力,应用理论分析的方法,对传感器故障进行监测和诊断,不需要增加硬件设备,还会降低成本,对故障的检测与分离准确率也高。为此,出现了多种故障诊断方法,概括地讲,可分为两大类: 基于控制系统动态模型的方法和不基于模型的故障诊断方法。本文采用理论推导的方法详细介绍了基于模型的各种诊断方法和不基于模型的现阶段神经网络诊断方法,并对基于模型的故障诊断方法和神经网络诊断方法的优缺点进行了对比,最后还分析了现有故障诊断方法的发展趋势。

1 基于控制系统动态模型的方法

其诊断思路是利用观测器或滤波器对控制系统的状态或参数进行重构,并构成残差序列,然后采用一些措施来增强残差序列中所包含的故障信息,抑制模型误差等非故障信息,通过对残差序列的统计分析就可以检测出故障的发生并进行故障的诊断。此方法又分为以下三种典型的故障诊断方法

1.1 卡尔曼滤波法

系统状态方程和测量方程为

$$\begin{aligned}x(k+1) &= H(k+1,k)x(k) + B(k+1)u(k) + \Gamma(k+1)w(k) \\ y(k+1) &= H(k+1)x(k+1) + v(k+1)\end{aligned}$$

其中, $x \in R^n$ 为状态向量, $u \in R^q$ 为输入向量, $w \in R^n$ 为过程噪声, $y \in R^m$ 为输出测量向量, $v \in R^m$ 为测量噪声。设 $w(k)$ 和 $v(k)$ 是互不相关的零均值白噪声序列,则卡尔曼滤波残差序列

$$\hat{V}(k+1) = \hat{y}(k+1) - y(k+1) = y(k+1) - H(k+1)\hat{x}(k+1|k)$$

初始条件为 $\hat{x}(0|0) = \hat{x}(0) = 0$, $P(0|0) = P(0)$,由此可成功设计卡尔曼滤波器。

若残差序列满足 $|\hat{V}_i(k)| \leq \lambda_i, (i=1,2,\cdots,m)$,表示传感器无故障,否则表明第 i 个传感器出现硬故

障. 其中 λ_i 为第 i 个传感器的硬故障阈值, 它由传感器噪声标准方差确定, 若考虑被测量系统的建模误差, 硬故障阈值常取标准方差的两倍. 此种方法较为成熟, 已成功地应用在 $F100$ 发动机上^[1].

1.2 修正的序列概率比故障检测法

传感器正常工作时, 其输出的最优估计由卡尔曼滤波器给出, 残差序列 $V(k+1)$ 服从正态分布 $N(0, \sigma^2)$, 用模式 H_0 表示. 当传感器出现故障时, 将在 $V(k+1)$ 中反映出来, 假定此时残差序列 $V(k+1)$ 服从正态分布 $N(0, \sigma^2)$, 用模式 H_1 表示.

由 $V(i)$ 与 $V(j) (i \neq j)$ 之间相互独立性及正态分布特性, 序列概率比方法的最优决策律由下式给出

$$\lambda_j(n) = \sum_{i=1}^n \ln \frac{e^{-\frac{(V_j(i) - \bar{V}_j)^2}{2\sigma_j^2}}}{e^{-\frac{V_j^2(i)}{2\sigma_j^2}}}, \quad j = 1, 2, \dots, m$$

其中 $\bar{V} = [\bar{V}_1, \bar{V}_2, \dots, \bar{V}_m]^T$, $\sigma^2 = \begin{bmatrix} \sigma_1^2 & \dots & \sigma_m^2 \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \dots & \sigma_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{m1} & \sigma_{m2} & \dots & \sigma_m^2 \end{bmatrix}$ 为 V_1, V_2, \dots, V_m 的协方差阵. 上式进一步化简为

$\lambda_j(n) = \lambda_j(n-1) + \frac{1}{\sigma_j^2} (V_j(n) - \bar{V}_j)^2$, $j = 1, 2, \dots, m$ 令 T 和 U 分别代表故障的误报率和漏报率. 可得两个阈值如下:

$$A = \ln \left[\frac{U}{1-T} \right], \quad B = \ln \left[\frac{1-U}{T} \right]$$

若 $\lambda_j(n) \geq B$, 则接受 H_1 假设, 表明第 j 个传感器在 n 时刻以前发生故障; 若 $\lambda_j(n) \leq A$ 则接受 H_0 假设, 表明第 j 个传感器在 n 时刻以前未发生故障; 若 $A < \lambda_j(n) < B$, 则需继续检测.

序列概率比故障检测法的一个缺点是系统正常运行时 $\lambda_j(n)$ 有下降的趋势, 此下降趋势的累积将造成序列概率比方法产生一个时延.

1.3 基于多重假设检验的方法

对应 m 个被检测的传感器, 应有 $m+1$ 个卡尔曼滤波器, 其中一个滤波器对应无故障状态, 而其余 m 个滤波器对应 m 个被检测传感器的故障模式. 例如第 1 个假设滤波器 H_1 使用了被检测系统输出的所有变量, 但除了第 1 个被检测变量之外, 以此类推, 第 i 个假设滤波器 H_i 使用了被检测发动机输出的所有变量, 但除了第 i 个变量之外. 第 i 个滤波器产生残差向量 V_i , 由此根据残差加权平方和 $WSSR$ 计算似然 L_i , 不失一般性, 假设传感器噪声为高斯分布, 则残差 V_i 的似然或概率为

$$L_i = p(V_i) = K e^{-WSSR}, \quad i = 1, 2, \dots, m$$

其中, K 是常数, $WSSR = V_i^T \sum^{-1} V_i$, 而 $\sum = \text{diag}(\sigma_i^2)$, σ_i^2 是第 i 个传感器的标准方差. 其对数似然比为

$$LR_i = \ln \left[\frac{L_i}{L_0} \right] = WSSR_0 - WSSR_i, \quad i = 1, 2, \dots, m$$

则故障检测与隔离的判决规则如下:

若

$$\max_i LR_i > \lambda_i^2, \quad i = 1, 2, \dots, m$$

则第 i 个传感器发生故障, 否则传感器无故障. 其中 λ_i^2 为第 i 个传感器的故障阈值, $\max_i LR_i$ 为 m 个似然比中的最大者.

该方法尤其适合诊断传感器的软故障, 一般与卡尔曼滤波法结合使用^[1].

2 不依赖于动态模型的典型故障诊断方法

2.1 表决法

表决法是直接余度法或称之为硬件余度法的典型例子. 在标准的表决法中, 至少用三个以上相同类型的传感器去测量同一个变量, 然后采用表决法来检测和辨识故障的传感器. 表决法具有执行容易, 检测速度快, 直截了当等优点, 但是它们仅适用于具有高余度的系统中, 并且通常不具有由不同传感器提供的余度信息以及对软故障难以检测, 对故障大小不敏感等缺点.

2.2 限制值检验法

在正常情况下,传感器测量值在一定范围内变动:

$$y_{\min}(k) \leq y(k) \leq y_{\max}(k)$$

如果连续三或四次超过这个范围,则表明该传感器发生故障或将要发生故障。称这种故障检测的方法为限制值检验法。另外,还可以结合测量值的速率变化是否满足

$$\dot{y}_{\min}(k) \leq \dot{y}(k) \leq \dot{y}_{\max}(k)$$

来判别故障发生与否。

2.3 故障树的诊断方法

此方法由计算机依据故障与原因的先验知识和故障率知识自动辅助生成故障树,并自动生成故障树的搜索过程。诊断过程是从系统的某一故障开始,沿着故障树不断提问“为什么出现这种现象?”而逐级构成一个递阶故障树,通过对此故障树的启发式搜索,最终查出故障的根本原因。在提问过程中,有效合理地使用系统的实时动态数据将有助于诊断过程的进行。这种方法类似于人类的思维方式,易于理解,在实际中应用较多,但大多与其他方法结合使用。

2.4 基于人工神经网络的诊断方法

近年来,人工神经网络以其独特的容错、联想、推测、记忆、自适应、自学习和处理复杂多模式等优点,在许多学科中掀起了研究的热潮,同样在故障诊断领域,其发展前景也是十分乐观的。在知识获取上,神经网络的知识只需要用领域专家解决问题的实例或者范例来训练神经网络;在知识表示方面,神经网络采取隐式表示,并将某一问题的若干知识表示在同一网络中,通用性强,便于实现知识的自动获取和并行联想推理;在知识推理方面,神经网络通过神经元之间的相互作用来实现推理。目前在许多领域的故障诊断系统中已开始应用,如在化工设备、核反应堆、汽轮机、旋转机械和电动机等领域都取得了较好的效果。一般有

(1)用神经网络构造观测器。该方法根据传统的观测器模型确定出神经网络观测器输入输出信号间的映射关系,用一组在系统正常运行时取得的数据对神经网络观测器进行训练,训练好的神经网络观测器用来产生故障残差。这种方法原理清晰,既保留了基于模型故障诊断方法的特点,又发挥了神经网络的优势,是一种应用较早,比较成熟的故障诊断方法。

(2)用神经网络预测传感器输出。该方法用神经网络对传感器输出序列建立预测模型,网络输入是传感器前 m 个采样时刻的 m 个输出值,网络输出是传感器当前时刻 $(m+1)$ 时刻的输出,将传感器实际输出与神经网络预测输出比较生成残差。该方法增加了可用于故障诊断的信息量,提高了诊断结果的可靠性。

(3)用神经网络对传感器故障做一步诊断。目前比较通用的方法是加入模糊量化规则,对传感器输出信号进行处理,使输入到神经网络的数据特征更加突出,更有利于神经网络对传感器故障的准确分离。

随着对基于神经网络的传感器故障诊断方法的深入研究,一些高效的网络结构(如径向基函数网络)和新的算法(如遗传算法)被应用其中,给该方法的进一步发展注入了活力;同时,信息技术的发展,大规模集成电路的广泛应用,也使神经网络诊断方法的实用成为可能。但由于神经网络从故障事例中学到的知识只是一些分布权重,而不是类似于领域专家逻辑思维的生成式规则,因此诊断推理过程不能够解释,缺乏透明度。

3 模型法与神经网络法的比较

基于模型的故障诊断方法,其特点是依赖被诊断对象的精确模型,优点是能深入系统本质的动态性质和实现实时诊断,但是在实际的诊断中,对象的精确模型很难获得,或者虽然得到了某一时刻的精确模型,但随着运行时间的推移,系统参数发生漂移,模型的准确性变差,此时,根据模型法得到的诊断结果可靠性显著下降,故障的误报率增加。正因如此,近年来,对于模型法的研究主要集中在:如何提高诊断方法对模型失配的适应性、如何增强对未知输入干扰的鲁棒性以及自适应于阈值的确定等方面。其缺点

是当系统模型未知、不确定或者具有非线性时,这种方法不易实现。

人工神经网络在处理信息方面具有:并行性、鲁棒性、记忆性、自组织性等显著优势,已经被很多学者作为故障诊断研究的主要手段。由于传感器故障诊断的信息量通常较大,受干扰的因素也比较多,因此采用神经网络故障诊断是一种理想的解决方法。但是,神经网络故障诊断也有其自身的缺点:在诊断过程中,其自身权值、阈值对应的物理意义不明确;其算法的实现较为复杂;用软件的方式实现很难体现出神经网络并行处理数据的能力,而用硬件的方式实现成本较高等。表 1给出了模型法和神经网络两种故障诊断方法的比较。

表 1 模型法与神经网络故障诊断方法优缺点的比较

诊断类型	优 点	缺 点	今后的研究方向
模型法	1.用以诊断的模型机理清楚 2.诊断结构简单,易实现	1.对模型的依赖性强 2.非线性系统建模较难 3.所建模型的适应性差	1.提高其鲁棒性 2.检测阈值的适应性 3.残差与阈值的生成的联合设计问题
神经网络法	1.该方法鲁棒性较好 2.对干扰的适应性强 3.处理数据的速度快	1.其网络结构的实现困难 2.网络训练用到的数据必须精心挑选 3.模型结构的物理意义不明确	1.高性能神经网络的研究 2.神经网络与模糊等其他方法的联合使用 3.神经网络的硬件实现

表 1给出了两类故障诊断方法的优缺点比较。随着理论研究的进展和技术水平的不断提高,传感器故障诊断的研究会更趋于实用化,一些在实际中遇到的问题会逐步得到解决。

4 近年来传感器故障诊断方面的研究成果

根据以上对传感器故障诊断方法的介绍,给出如表 2所示的有关传感器故障诊断方面的研究成果

表 2 传感器故障诊断方面的研究成果

诊断对象	诊断原理和方法	文献
火电厂过热气温控制系统	状态观测器	[8]
摆式列车加速度传感器	神经网络预测器	[12]
多传感器组合导航系统	联合卡尔曼滤波	[18]
生物发酵	联合神经网络	[19]
连续搅拌釜式反应器	RBF神经网络	[9]
凝汽式汽轮机调速系统	BP神经网络	[20]

5 传感器故障诊断方法的发展趋势

故障智能诊断系统是现有传感器故障诊断方法的发展趋势之一^[6-7]。由于神经网络理论为故障智能诊断系统的发展开辟了崭新的途

径,用神经网络建立诊断系统,不需要组织大规模的产生式规则,也不需要进行树搜索,系统可以自组织、自学习,并可进行模糊推理,这对用建立专家系统最感困难的知识获取和推理等问题提供了新的解决方法。目前,故障智能诊断系统无论在理论上还是在系统开发方面都已取得了很大的进步,但真正投入使用和功能完善的系统并不多,大多数研究还停留在实验室阶段。故障智能诊断系统的成功不是一朝一夕的事情,需要相关学科的密切配合。目前,广大科研工作者正向这一目标迈进,其前景是光明的。总之,传感器的故障诊断是一门综合性技术,其研究涉及到多个领域,如现代控制理论、矩阵理论、可靠性理论、数理统计、数字信号处理、神经网络等。经过多年的研究,已经取得了丰硕的成果,但也存在一些亟待解决的问题。因此,传感器的故障诊断有着深厚的理论基础和广阔的研究空间。

参考文献:

[1] WALTER C, MERRILL. Advanced Detection, Isolation, and Accommodation of Sensor Failure-Engine Demonstration Results[J]. NASA, 1988. TP-2 836

[2] WALTER C, MERRILL, JOHN C, et al. Advanced Detection, Isolation, and Accommodation of Sensor Failures-Real-Time Evaluation [J]. NASA Technical Paper, 1987. 2 740.

[3] 周东华,孙优贤.控制系统的故障检测与诊断技术[M].北京:清华大学出版社,1994.

[4] 蒋东方.基于分析冗余的故障检测与诊断研究[M].西安:西北工业大学出版社,2000.

[5] 许秀玲. X型涡扇发动机控制系统传感器故障诊断[D].西安:西北工业大学硕士论文,2003.

- [6] 王道平,张义忠.故障智能诊断系统的理论与方法[M].北京:冶金工业出版社,2001.
- [7] 闻新,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,2000.
- [8] 黄孝彬,牛玉广等.基于模糊动态模型的传感器故障诊断方法[J].中国电机工程学报,2003,23(1): 183-187.
- [9] 李尔国,俞金寿.一种基于 RBF 神经网络的传感器故障诊断方法[J].华东理工大学学报,2002,28(6): 640-643.
- [10] 罗中良,高潮.一种多传感器数据融合方法及应用[J].传感器技术,2002,(2).
- [11] 张彦铎,姜兴渭.传感器故障诊断中的数据关联方法与应用[J].传感器技术,2001,(5).
- [12] 吴浩中,黄飞鹏.基于 RBF神经网络的传感器故障诊断研究[J].机车电传动,2003,(2).
- [13] MGER S L P. Fault Detection and Accommodation Testing on an F100 Engine in an F-15 Airplane[J]. NASA, 1985. TM-86 735.
- [14] JOHN C, DELAAT, WALTER C. A Real Time Microcomputer Implementation of Sensor Failure Detection for Turbofan Engines[J]. IEEE control system, magazine, 1990,10(4).
- [15] GUO T-H, SAUS J, LIN C-F, et al. Sensor Validation for Turbofan Engines Using an Auto-associative neural network[C]. AIAA Guidance Navigation and Control Conference, 1996. 1-8.
- [16] 刘勇,沈毅.传感器故障检测、分离与恢复的神经网络方法[J].仪器仪表学报,1999. 12.
- [17] 于勇,万德钧.一种基于小波神经网络故障检测方法的仿真研究[J].计算机仿真,2000. 17.
- [18] 崔平远,黄晓瑞.基于联合卡尔曼博的多传感器信息融合算法及其应用[J].电机与控制学报,2001. 9.
- [19] 张颖伟,王福利.基于联合神经网络的冗余传感器故障诊断和信号重构[J].信息与控制,2003,32(2): 170-171.
- [20] 曹曦,苏明.BP神经网络用于传感器故障诊断的仿真研究[J].上海铁道大学学报,2000,21(6): 43-47.

【责任编辑: 邓军文】

Research on the method for sensor fault diagnosis

XU Xiu-ling, WANG Xiao-dong

(Information Science & Engineering College, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China)

Abstract Nowadays, fault diagnosis for sensors is a hot field under investigation. In this paper, not only the method of sensor diagnosis based on model but also the method based on uncertainty-model is introduced. The former contains kalman filter and multiple-hypothesis-based testing which are deduced particularly from theory. The sensor diagnosis method based on neural network is introduced carefully later. At the same time, their advantages and disadvantages are analyzed and compared. Finally, the trend of fault detection and diagnosis method is discussed.

Key words sensor; fault detection and diagnosis; kalman filter; neural network