

基于观测器方法的故障诊断技术 若干重要问题的探讨¹⁾

周东华 叶昊 王桂增

(清华大学自动化系 北京 100084)

Ding Xianchun

(Lausitz 大学电器工程系 德国)

摘要 基于观测器方法的故障诊断技术近年来得到了迅速发展,取得了许多可喜的成果. 该文探讨了这一领域中一些重要的热门研究问题,包括:基于观测器方法的检测与诊断系统的分析与评价方法,以及基于观测器的检测系统的设计方法. 重点介绍作者在这一领域的一些最新研究成果,如故障空间的划分,检测系统的集成设计方法等.

关键词 观测器,故障诊断,检测系统,分析,设计.

1 引言

近年来,随着对动态系统的故障检测与诊断技术研究的进一步深入,人们注意到基于观测器方法的故障检测与诊断系统在实际应用中存在着几个迫切需要解决的问题^[1,2]:

- 1) 如何对故障检测系统的性能进行分析与评价;
- 2) 如何在提高检测系统关于故障灵敏度的同时,达到低的误报率;
- 3) 如何有效地解决故障分离和辨识问题.

本文的主要目的是介绍与探讨近年来国内外发表的有关这些问题的新方法,重点介绍作者在这一领域中的一些新的研究成果. 评述的重点将放在基于观测器的故障检测与诊断系统的分析与设计. 对其他方法感兴趣的读者可进一步参阅文^[2,4,5].

2 问题描述与研究背景

众所周知,基于观测器的故障检测与诊断系统的设计是建立在系统模型之上的. 由于在建模过程中总是要做一些近似化,特别是在处理非线性系统时,人们往往采用线性化技术,并且在实际系统中,不可测干扰是不可避免的. 因此,模型的这些不确定性会直接影响到检测系统的性能指标,特别是会导致误报和系统的灵敏度降低^[1].

为解决这一问题,人们从80年代末期起,借助于当时已经较为成熟的鲁棒控制理论,把研

1)国家自然科学基金、国家教委资助优秀青年教师基金和“八六三”基金资助项目.

究重点放在基于观测器的残差序列产生器(residual generator)的鲁棒性上,成功地发展了基于等价空间的时域优化方法^[6]和基于 H_∞ 及 H_2 的频域方法^[7]. 然而这些方法在应用中并未达到预期的效果. 因为尽管采用了鲁棒残差序列产生器,但模型不确定性和不可测干扰仍然对残差序列有影响. 为降低和防止误报,有必要对残差序列进行处理,并建立适当的阈值^[8].

在对残差序列进行处理时,往往采用比较简单的信号处理方法. 最近,文[3]提出了残差序列产生器与残差序列处理及阈值选取的集成设计新概念,并从理论上证明,将残差序列产生器和处理器作为一个整体,系统性地优化,可以有效提高系统的灵敏度,同时降低误报率. 我们将在本文第4节对此问题给予较为详细介绍.

随着越来越多的新设计方法的出现,人们逐渐意识到基于观测器的故障检测系统的性能分析与性能评价的重要性. 这不仅对工程技术人员在选择或设计基于观测器的故障检测系统时起着举足轻重的作用,而且对这一理论与技术的发展有着重要的影响. 特别是为解决故障检测系统的优化问题,系统对故障的灵敏度,以及对于模型不确定性的鲁棒性的分析与计算,提供了必要的理论工具与基础.

90年代以来,文[2,4,5,9-11,18]提出了将自适应观测器/滤波器用于故障检测与诊断的新思想,并成功地发展了基于自适应观测器/滤波器的故障检测与诊断系统. 从某种意义上看,这些方法可以看成是基于观测器和参数辨识方法的结合. 这一发展构成了故障检测与诊断领域的一个新的发展方向. 它部分解决了模型不确定和有不可测干扰的问题. 特别是,与大部分基于常规观测器的方法不同,这些方法适用于解决非线性系统问题.

从近年来国内外发表论文的现状来看,可以说检测与诊断系统的性能分析与评价,鲁棒性研究与优化,以及对基于自适应观测器/滤波器的检测与诊断系统的研究,构成了这一领域的几个重要热门研究方向.

3 基于观测器的故障检测与诊断系统的分析与评价

3.1 检测与诊断系统的构成与设计

到目前为止,人们对此问题的讨论大多局限在线性不确定性系统. 并已形成了较为系统性的设计理论与方法. 我们考虑的系统为

$$y(s) = G_u(s)u(s) + G_f(s)f(s) + \Delta y(s), \quad (1)$$

其中 $y \in R^m$ 为可测的输出量; $u \in R^q$ 是输入信号; $f \in R^p$ 代表所要检测的故障; $G_u(s) \in R^{m \times q}$, $G_f(s) \in R^{m \times p}$ 为已知的传递函数矩阵; $\Delta y \in R^m$ 用来表示模型不确定性和不可测干扰; 一般可将 $\Delta y(s)$ 写成 $\Delta y(s) = G_d(s)d(s)$, 并假定 $d(s)$ 是有界的

$$\|d(s)\|_2 \leq \Delta d. \quad (2)$$

显然, $G_d(s)$ 的结构可描述 $\Delta y(s)$ 的不确定程度. 若没有关于 $\Delta y(s)$ 先验信息, 则 $\Delta G(s)$ 可以取为 $G_d(s) = I$. 将 $\Delta y(s)$ 代入(1)式, 有

$$y(s) = G_u(s)u(s) + G_d(s)d(s) + G_f(s)f(s). \quad (3)$$

已经证明^[1,12], 所有基于线性观测器和等价空间的残差序列产生器均可由下式描述:

$$r(s) = R(s)(\hat{M}_u(s)y(s) - \hat{N}_u(s)u(s)), \quad (4)$$

这里 $r(s)$ 代表残差序列, 即在 $d(s) = 0$ 时, $r(s) = 0 \Rightarrow f(s) = 0$; $r(s) \neq 0 \Rightarrow f(s) \neq 0$.

在残差序列产生器(4)中, $R(s)$ 是一个任意选取的 RH_∞ 传递函数矩阵, 即 $R(s)$ 代表一个

稳定系统. 从物理意义上看, 可将其当做一个后置滤波器(post-filter). 假设 $G_u(s)$ 的状态空间的实现为 $G_u(s) = C(SI - A)^{-1}B + D$, 则有^[1,12]

$$\hat{M}_u(s) = I - C(sI - A + LC)^{-1}L, \quad \hat{N}_u(s) = D + C(sI - A + LC)^{-1}(B - LD),$$

这里 L 可等价视为观测器的反馈阵, 其选取条件是保证系统矩阵 $A - LC$ 稳定.

文[13]证明了(4)式可等价写成

$$r(s) = R(s)(y(s) - \hat{y}(s)), \quad (5)$$

其中 $\hat{y}(s)$ 为任意基于观测器的输出信号 $y(s)$ 的估计值. 由此式可进一步推出^[13]

$$r(s) = R(s)\hat{M}_u(s)(G_d(s)d(s) + G_f(s)f(s)). \quad (6)$$

(4)式为残差序列的构成器, 用于在线计算. 而(6)式表示了此系统的内在关系, 用于系统的设计. 可以证明^[13], 任何基于观测器或等价空间的设计方法, 都可以等价视为选取 L 和 $R(s)$ 的算法, 其中较为有代表性的有 1) 等价空间方法^[14,17]; 2) 故障检测滤波器方法^[6,15]; 3) Lu-enberger 观测器方法^[6,16]; 4) 鲁棒观测器方法(未知输入观测器方法)^[1].

由(6)式可以较为容易的推出, 残差序列 $r(s)$ 可用于故障检测与分离, 其与 $d(s)$ 无关的充要条件是^[1,12]

$$\text{rank}[G_d(s) \quad G_f(s)] = \text{rank}[G_d(s)] + \text{rank}[G_f(s)]. \quad (7)$$

这是一个很严格的条件, 如此式不能满足, 则 $d(s)$ 将对 $r(s)$ 有影响. 采用鲁棒技术可减少此影响, 但要完全避免由 $d(s)$ 引起的误报, 一般需引入一个残差序列处理与评价子系统. 对残差序列的处理可以采用经典的信号处理方法^[17]. 目前, 与基于观测器的残差序列产生器一起经常使用的残差序列处理函数包括:

时域的均方根函数

$$\|r(t)\|_e = (\tau^{-1} \int_0^\tau r^T(t)r(t)dt)^{1/2}, \quad \tau = t_2 - t_1, t_2 > t_1; \quad (8)$$

时域的绝对值函数 $\|r(t)\|_e = \max_{t \in \tau} |r(t)|, \tau = t_2 - t_1, t_2 > t_1; \quad (9)$

频域的均方根函数 $\|r(j\omega)\|_e = (1/\Phi \int_{\omega_1}^{\omega_2} r^*(j\omega)r(j\omega)d\omega)^{1/2}; \Phi = \omega_2 - \omega_1. \quad (10)$

函数(8)和(10)可以理解为对残差序列在某一时间和频率段上所含能量的平均值. 选定了残差序列处理函数, 便可以确定阈值. 在假定条件(2)成立的前提下, 我们可以选用 d 对残差序列的最大影响(在无故障的情况下)作为阈值, 以确保排除误报. 所以, 一般可以根据下式计算阈值

$$J_{th} = \text{SUP}_{f=0} \|r\|_e = \text{SUP}_d \|RM_u G_d d\| = \|RM_u G_d\|_e \text{sup}_d \|d\| = \|RM_u G_d\|_+ + \Delta d, \quad (11)$$

这里 $\|RM_u G_d\|_+ = \text{SUP}_{d \neq 0} \frac{\|RM_u G_d d\|}{\|d\|}$. 可以看出, 一个新型的基于观测器的故障检测系统的组成已超出了 20 年前 Jones^[15] 提出的故障诊断系统的原始概念.

3.2 基于观测器的故障检测系统的分析

众所周知, 系统设计是以系统的分析和性能评价为前提的. 由于传统的基于观测器的故障检测系统仅限于残差序列产生器, 人们往往以观测器的一些特性作为评价检测系统的指标. 近年来的一些研究表明^[3], 这样对系统分析与评价是远远不够的, 其结果会导致一些设计

方法的失败或不恰当的应用^[3]. 这里,我们将介绍并探讨对基于观测器的故障检测系统进行分析的新理论. 从工程应用的角度来看,衡量故障检测系统的一个重要标志是,“在没有误报的前提下,及时检测出早期的故障”. 换句话说,可检测故障的大小是一个重要的指标. 我们知道,一个故障可以检测出来的前提是,由它引起的经过处理的残差序列必须大于阈值,即 $\|r\|_e > J_{th}$. 利用(6)式,可以将此式写为

$$\|RM_u G_d d + RM_u G_f f\|_e > J_{th}. \quad (12)$$

考虑到 d 的不确定性,条件(12)应对所有可能出现的 d 成立,这导致了

$$\sup_d \|RM_u G_d d + RM_u G_f f\|_e > J_{th} \Leftrightarrow \|RM_u G_f f\|_e - \sup_d \|RM_u G_d d\|_e > J_{th}.$$

若 J_{th} 根据(11)式确定,并且有

$$\|RM_u G_f f\|_e > 2J_{th}, \quad (13)$$

则可以验证,故障 f 在上述意义下是可以检测的.

现在研究故障空间的划分,并导出可检测和不可检测故障的子空间. 为此,引入定义

$$\|RMG_f\|_- = \inf_{f \neq 0} \frac{\|RM_u G_f f\|_e}{\|f\|_e}. \quad (14)$$

从工程应用的角度来看, $\|RMG_f\|_-$ 可以理解为故障对残差序列的最小影响. 很明显,对任意故障 f , 有不等式

$$\|RMG_f\|_- \|f\|_e \leq \|RM_u G_f f\|_e \leq \|RM_u G_f\|_+ \|f\|_e. \quad (15)$$

由此可知,故障 f 若满足

$$\|f\|_e > \frac{2J_{th}}{\|RM_u G_f\|_-} \Rightarrow \|RM_u G_f f\|_e > 2J_{th}, \quad (16)$$

则是可检测的;反之,若

$$\|f\|_e \leq \frac{2J_{th}}{\|RM_u G_f\|_+} \Rightarrow \|RM_u G_f f\|_e \leq 2J_{th}, \quad (17)$$

则 f 是不可测的. 因此,满足不等式

$$\frac{2J_{th}}{\|RM_u G_f\|_+} < \|f\|_e \leq \frac{2J_{th}}{\|RM_u G_f\|_-} \quad (18)$$

的故障有可能是可检测的,也有可能是不可检测的. 这样 $T_1 = 2J_{th} / \|RM_u G_f\|_-$ 和 $T_2 = 2J_{th} / \|RM_u G_f\|_+$. 将故障空间化为三个子空间: $S_1 = \{f | \|f\|_e > T_1\}$; $S_2 = \{f | T_2 < \|f\|_e \leq T_1\}$; $S_3 = \{f | \|f\|_e \leq T_2\}$. 其中 S_1 只含有可检测故障, S_3 只含不可检测故障, S_2 中的故障的可检测性不确定.

3.3 基于观测器的故障检测系统的性能评价

基于上节的分析结果,我们引入基于观测器的故障检测系统的性能评价指标. 由(16)式可知, $J_{th} / \|RM_u G_f\|_-$ 越小(或子空间 S_1 越大),则可检测的故障越多,且因为可检测的故障范数变小,早期检测出故障的可能性越大; $J_{th} / \|RM_u G_f\|_+$ 越小,子空间 S_3 越小. 但是,值得注意的是,由于 S_2 的不确定性,这并不意味着 S_1 子空间的增大,或可检测故障的增多. 因此, $J_{th} / \|RM_u G_f\|_-$ 较 $J_{th} / \|RM_u G_f\|_+$ 更适合评价系统的性能. 为此,定义

$$S = \frac{\|RM_u G_f\|_-}{J_{th}} = \frac{\|RM_u G_f\|_-}{\|RM_u G_d\|_+ \Delta d} \quad (19)$$

为基于观测器的检测系统的灵敏度.

显然,灵敏度 S 的计算取决于所采用的残差序列处理函数. 若将 $\|r\|_e$ 取为 $\|r\|_2$, 对应

于频域的均方根函数,有^[3]

$$\begin{aligned}\|RM_u G_d\|_+ &= \sup_{\omega \in (\omega_1, \omega_2)} \bar{\sigma}(R(j\omega)\hat{M}_u(j\omega)G_d(j\omega)), \\ \|RM_u G_d\|_- &= \inf_{\omega \in (\omega_1, \omega_2)} \underline{\sigma}(R(j\omega)\hat{M}_u(j\omega)G_d(j\omega)).\end{aligned}\quad (20)$$

从物理意义上看,由(19)式定义的灵敏度 S 是故障对残差序列最小的影响与不可测干扰和不确定性 d 对残差序列最大影响之比. 与较为流行的评价指标^[1,8] $\frac{\|RM_u G_f\|_\infty}{\|RM_u G_d\|_\infty}$ 或 $\frac{\|RM_u G_f\|_2}{\|RM_u G_d\|_2}$ 相比,它可看成是一种最坏情形的处理方法.

正如在引言中所述,人们对检测系统的设计目标为尽可能地提供系统对故障的灵敏度,同时保证低误报率. 为此,可将其描述为

$$\max_{R,L} S. \quad (21)$$

4 基于观测器的检测系统的设计方法

自 90 年代起,人们将基于观测器的检测系统的设计重点放在解决鲁棒性问题上^[8]. 现有的方法可以分为两类,即基于鲁棒理论的设计方法和系统集成设计方法.

4.1 后置滤波器 $R(s)$ 和观测器反馈阵 L 的选择

最近文^[13]证明了下述结论. 令 L_0 为一个观测器反馈阵,并记

$$\hat{M}_{u0}(s) = I - (sI - A + L_0 C)^{-1} L_0, \quad \hat{N}_{u0}(s) = D + C(sI - A + L_0 C)^{-1} (B - L_0 D),$$

则任意残差序列产生器可以写为

$$r(s) = R_0(s)(\hat{M}_{u0}(s)y(s) - \hat{N}_{u0}(s)u(s)) = R_0(s)\hat{M}_{u0}(s)(G_d(s)d(s) + G_f(s)f(s)),$$

这里 $R_0(s) \in RH_\infty$. 上式表明,通过选择后置滤波器 $R(s)$,可以使残差序列产生器的动态特性与 L 阵的选择无关. 利用此结论,可以大大简化优化问题(21)的解. 因为

$$\max_{R,L} S = \max_R S |_{L=L_0}. \quad (22)$$

4.2 基于鲁棒理论的设计方法

基于鲁棒理论的设计方法起源于 80 年代末^[14,17]. 随着 H_2 和 H_∞ 优化理论的完善化,人们逐渐将这一技术用于检测系统的优化设计. 重点是观测器或基于观测器的残差序列产生器的鲁棒性问题.

4.3 系统集成设计方法

这里给出的系统集成设计方法是建立在 3.2, 3.3 小节的系统分析之上. 其中心思想是将残差序列产生器与处理器和阈值的选择结合在一起,设计目标是优化检测系统的灵敏度

$$\max_R S \Leftrightarrow \max_R \frac{\|RM_u G_f\|_-}{\|RM_u G_d\|_+}. \quad (23)$$

文^[3]推导出了关于以(8)和(9)式为残差序列处理函数的优化问题(23)的解. 优化问题具有下述特征^[3]

$$1) \|r\|_e = \|R^* \hat{M}_u (G_d d + G_f f)\|_e \leq \|f\|_e + \|R^* \hat{M}_u G_d d\|_e; \quad (24)$$

2) 最优解 R^* 可以表示为, $R^* = R_1 + R_0 R_2$, 这里 R_1 和 R_2 满足

$$\|R_1 \hat{M}_u G_f\|_+ = \|R_1 \hat{M}_u G_f\|_- = 1; \quad R_2 \hat{M}_u G_f = 0; \quad R_0 \text{ 为优化问题}$$

$$\min_{R_0 \in RH_\infty} \|R_1 \hat{M}_u G_d + R_0 R_2 \hat{M}_u G_d\|_+ \quad (25)$$

$$3) \quad T_1 = T_2.$$

性质 1) 表明,当不可测干扰和模型不确定性对残差序列影响较小时,残差序列的范数与故障的范数近似相等. 性质 2) 说明,不可测干扰和模型不确定性的影响在(25)式的意义下被减到最小. 由性质 3) 可以看出,由于 $T_1 = T_2$,子空间 S_2 消失,整个故障空间因此仅分为可测和不可测子空间,即

$$f \text{ 可检测, 若 } \|f\| > T_1; \quad f \text{ 不可检测, 若 } \|f\| \leq T_2.$$

将基于鲁棒理论和系统集成设计方法相比较,可以发现两个本质的差别如下:

1) 基于鲁棒理论设计的残差序列产生器是通过其强“方向”选择性来提高对干扰的鲁棒性,而由系统的集成方法得到的残差序列产生器则是通过一种补偿的方式,减小干扰对残差的影响;

2) 由于其强选择性,基于鲁棒理论设计的残差序列产生器的灵敏度一般来说比较低,因为它只对一个故障方向上的故障有极高的灵敏度,而对其它故障的灵敏度很低. 与此相反,利用系统集成方法得到的残差序列产生器对所有的可检测故障有同样的灵敏度. 在这种意义下,可以说前者是一种“最好情形”的处理,后者是一种“最坏情形”的处理.

5 结束语

基于观测器方法的故障诊断技术,在理论上,至少在检测系统的分析与设计以及故障的分离方面,已取得了较为丰硕的成果. 现存的主要理论问题有:1) 故障幅值的鲁棒估计;2) 同时发生传感器故障、执行器故障和元器件故障时的故障分离与决策等. 我们认为,属于自适应观测器/滤波器范畴的强跟踪滤波器方法是解决上述问题的一种很有希望的方法^[2,4,5,9,18].

参 考 文 献

- 1 Frank P M, Ding X. Frequency domain approach to optimally robust residual generation and evaluation for model based fault diagnosis. *Automatica*, 1994, **30**:789—904
- 2 周东华,孙优贤. 控制系统的故障检测与诊断技术. 北京:清华大学出版社,1994
- 3 Ding X, Guo L. Optimization of observer based fault detection systems. In: Proc. IFAC Symp. SYSID'97. 1201—1206
- 4 周东华,王庆林. 基于模型的控制系统的故障诊断技术的最新进展. *自动化学报*, 1995, **22**(2):244—248
- 5 周东华,席裕庚,张钟俊. 故障检测与诊断技术. *控制理论与应用*, 1991, **8**(1):1—10
- 6 Patton P J, Frank P M, Clark R N. *Fault Diagnosis in Dynamic Systems, Theory and Application*. New York: Practice Hall, 1989
- 7 Fatahian Y E, Kantor J C. Residual generation and fault detection for discrete-time systems using $i_{-\infty}$ technique. *Int. J. Control*, 1996, **64**(1):155—174
- 8 Frank P M. Enhancement of robustness in observer based fault detection. *Int. J. Control*, 1994, **59**:955—981
- 9 Zhou D H, Frank P M. Strong tracking filtering of nonlinear time-varying stochastic systems with colored noise: application to parameter estimation and empirical robustness analysis. *Int. J. Control*, 1996, **65**(2):295—307
- 10 Ding X, Frank P M. On-line fault detection in uncertain systems using adaptive observers. *European J. of Diagnosis and Safety in Automation*, 1993, **2**:9—21
- 11 Wang H, Daley S. On the use of adaptive updating rules for actuator and sensor fault diagnosis. *Automatica*, 1997, **33**:217—225
- 12 Ding X, Frank P M. Fault detection via factorization approach. *System and Control Letters*, 1990, **14**:431—436
- 13 Ding X, Guo L, Frank P M. Parameterization of linear observers and its application to observer design. *IEEE Trans.*

Autom. Control, 1994, **39**:1648—1652

- 14 Chow E Y, Willsky A S. Analytical redundancy and the design of robust failure detection systems. *IEEE Trans. Autom. Control*, 1984, **29**:603—614
- 15 Jones H L. Failure detection in linear systems. [Ph. D. Thesis], MIT Cambridge, 1973
- 16 Ge W, Fang C Z. Detection of faulty components via robust observation. *Int. J. Control*, 1988, **47**: 581—599
- 17 Lou X C, Willsky A S. Optimally robust redundancy relations for failure detection in uncertain systems. *Automatica*, 1986, **22**:333—344
- 18 周东华, 席裕庚, 张钟俊. 一种带多重次优渐消因子的扩展卡尔曼滤波器. *自动化学报*, 1991, **17**(6):689—695

DISCUSSION OF SOME IMPORTANT ISSUES OF OBSERVER BASED FAULT DIAGNOSIS TECHNIQUE

ZHOU DONGHUA YE HAO WANG GUIZENG

(Dept. Automation, Tsinghua Uni., Beijing 100084)

DING XIANCHUN

(Dept. Electrical Engineering, Lausitz Uni., Germany)

Abstract · In recent years observer based fault diagnosis technique is developed rapidly, and has led to many new results. In this paper, some important issues in this area, including analysis and evaluation of observer based detection and diagnosis system, and design method of this technique, are discussed. The emphasis is focused on some latest approaches proposed by the authors, such as the division of the fault space, the integrated design method of the detection system, etc.

Key words Observer, fault diagnosis, detection system, analysis, design.

周东华 1963 年出生, 1990 年获工学博士, 现任清华大学自动化系教授. 中国自动化学会故障诊断专业委员会秘书长. 已在国内外学术刊物上发表论文 38 篇, 并出版“控制系统的故障检测与诊断技术”专著一本. 主要研究方向为故障诊断与容错控制.

叶昊, 王桂增 简介见本刊第 23 卷第 6 期.

DING XIANCHUN 1958 年出生, 1992 年获工学博士, 现为德国 Lausitz 大学电器工程系终身教授. 已在国际上发表学术论文 60 余篇. 主要研究方向为系统辨识和控制系统的故障诊断.