

参考模型自适应方法在非线性执行器故障诊断中的应用

王爱平

(淮北煤炭师范学院·安徽淮北, 235000)

摘要: 提出了一种采用自适应技术来实现对动态系统中非线性执行器故障诊断的新方法. 执行器的故障可看成是由其参数的非期望变化所导致. 本文构造了一种自适应观测器, 由于该观测器的自适应部分包括了参数估计, 故障诊断可由参数估计直接获得. 文中证明了算法的收敛性, 并通过一个仿真实例说明了算法的实用性.

关键词: 执行器; 故障检测和诊断; 非线性自适应观测器; 严格正实

Nonlinear Actuator Fault Diagnosis: An Application of Model Reference Adaptive Technique

Wang Aiping

(Huabei Normal College · Anhui Huaibei, 235000, P. R. China)

Abstract: This short paper presents a novel solution to the fault diagnosis of nonlinear actuators in known deterministic dynamic systems. The actuator is characterized by a parameter vector whose unexpected changes are regarded as the faults in the actuator. A nonlinear adaptive observer is constructed which incorporates the estimation of the parameter vector. Using the well established procedure in the construction of adaptive updating rules in model reference adaptive control, online estimation of the parameter vector is obtained and is shown to be able to generate a desired diagnosis. An example is included in order to demonstrate the use of the proposed approach.

Key words: actuators; fault detection and diagnosis; nonlinear adaptive observer; strictly positive real

1 引言 (Introduction)

随着对自动控制系统可靠性要求的不断提高, 近年来关于自动控制系统故障检测及诊断的研究已越来越为人们所重视. 由此而产生了许多的算法: 如基于观测器的方法^[1,2]及基于参数辨识的方法^[3], 这些方法虽然成功地应用于不少实际系统, 但其出发点均为线性系统, 因此, 其关于非线性系统故障诊断的可用性难于证明. 此外, 这些方法关于检测的有效性一般优于对故障的诊断. 有鉴于此, 本文将探讨对于非线性系统的直接的故障检测及诊断, 并着重研究对非线性执行器的故障诊断. 由于一般非线性执行器的输入及输出均可由一个带有一组参数的非线性函数来描述, 根据文献[1~5], 非线性执行器的故障可由该组参数的非期望变化表示. 例如, 在液压执行器中, 其故障可由漏油系数的非期望减少来表示.

本文将利用模型参考自适应的原理来构造一个自适应观测器, 以实现对其参数变化的直接诊断.

2 系统表示与故障检测 (System representation and fault detection)

2.1 系统表示 (System representation)

设所考虑的系统由下式表示:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bf(\theta(t), u(t)), \quad (1a)$$

$$y(t) = C \cdot x(t) + n(t), \quad (1b)$$

其中 $x(t) \in \mathbb{R}^n$ 是不可测状态向量, $u(t) \in \mathbb{R}^m$ 是可测输入向量, $y(t) \in \mathbb{R}^m$ 是可测输出向量, $n(t)$ 为噪声项, A, B, C 分别为 $n \times n, n \times m$ 和 $m \times n$ 阶已知的参数矩阵, $f(\theta(t), u(t)) (f: \mathbb{R}^{p+m} \rightarrow \mathbb{R}^m)$ 是 $m \times 1$ 已知非线性执行器的特征, 且 $\theta \in \mathbb{R}^p$ 是参数向量, 其非期望变化即认作为执行器中发生了故障. 再假设偶对 (A, C) 是可观测的, 而且无故障时, $\theta(t) = \theta_H =$ 已知常向量. 因此, 故障检测与诊断的目的就是在故障发生时产生一个报警信号, 并作出对向量 θ 的精确估计.

2.2 故障检测观测器 (Fault detection observer)

由于故障诊断只是在故障检测之后进行的, 考虑到本文的完整性, 故先在本节中只描述故障检测. 为此构造如下非线性观测器:

$$\begin{aligned} \hat{\dot{x}}(t) &= A\hat{x}(t) + Bf(\theta_H, u(t)) + \\ &L_d(\hat{y}(t) - y(t)), \end{aligned} \quad (2a)$$

$$\hat{y}(t) = C\hat{x}(t), \quad (2b)$$

其中 $\hat{x}(t) \in \mathbb{R}^n$ 是观测器的状态向量, $\hat{y}(t) \in \mathbb{R}^m$ 是观测器的输出向量, 由于偶对 (A, C) 可观测, 可以选择矩阵 $L_d \in \mathbb{R}^{n \times m}$, 使得 $(A + L_d C)$ 为稳定矩阵, 定义

$$e(t) = \hat{x}(t) - x(t), \quad (3a)$$

$$e_0(t) = \hat{y}(t) - y(t) = Ce(t) - n(t), \quad (3b)$$

则观测误差为:

$$\dot{e}(t) = (A + L_d C)e(t) + B(f(\theta_H, u(t)) - f(\theta(t), u(t))) - L_d n(t). \quad (4)$$

取 $\|e_0\|$ 作为检测信号, 则故障检测可由下式导出:

$$\begin{cases} \|e_0(t)\| = \|Ce(t)\| < \lambda; \text{无故障发生.} \\ \|e_0(t_f)\| = \|Ce(t_f)\| \geq \lambda; \text{故障已发生.} \end{cases} \quad (5)$$

其中 λ 是预先指定的门坎值, 而 t_f 是故障发生的时间. 当 $n(t)$ 的上界 n_0 已知时, 可选 $\lambda \geq L_d n_0$.

3 故障诊断 (Fault diagnosis)

要在报警(5)产生之后诊断故障, 则观测器的构造如下:

$$\dot{x}_m(t) = Ax_m(t) + Bf(\hat{\theta}(t), u(t)) + L(Cx_m(t) - y(t)). \quad (6)$$

其中 $x_m(t) \in \mathbb{R}^n$ 是观测器的状态向量, $\hat{\theta}(t)$ 是 $\theta(t)$ 的估计, 在检测到故障之前, $\hat{\theta}(t)$ 的值被置为 θ_H . 假设 $t \geq t_f$ 之后发生了故障, 使得 $\theta(t) = \theta = \text{常数} \neq \theta_H$, 记

$$e_m(t) = x_m(t) - x(t) \quad (7)$$

为跟踪误差, 及

$$\varepsilon(t) = Cx_m(t) - y(t) = Ce_m(t) \quad (8)$$

为输出误差, 则可得:

$$\dot{e}_m(t) = (A + LC)e_m(t) + B(f(\hat{\theta}(t), u(t)) - f(\theta, u(t))) - Ln(t); \quad (t \geq t_f). \quad (9)$$

结果, 故障诊断的目的就是找出一种关于 $\hat{\theta}(t)$ 的诊断算法, 使得

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \hat{\theta}(t) = \theta. \quad (10)$$

既然在参考模型自适应控制^[6,7]得到的系统中, 其可调节部分与参考模型之间的误差方程在形式上与方程(8)和(9)相似, 于是可以得到下面的定理, 该定理可以产生估计故障向量 θ 的自适应诊断算法.

定理 假设

1) 对于自适应观测器(6)可以选择增量矩阵 L , 使其满足下列条件:

$$(A + LC)^T P + P(A + LC) = -Q, \quad (11)$$

$$C = B^T P. \quad (12)$$

其中 P 和 Q 是两个正定矩阵;

2) $f(\theta, u(t))$ 是连续的且一阶可导;

3) 有一个已知的正函数 $k_1(u(t)) > 0$ 及已知的正数 k_2 , 使得对 $\forall \theta_1, \theta_2 \in \mathbb{R}^p$, 不等式

$$\begin{aligned} & \|f(\theta_1, u(t)) - f(\theta_2, u(t)) - \\ & \frac{\partial f(\theta, u(t))}{\partial \theta} \big|_{\theta=\theta_1} (\theta_1 - \theta_2)\| \leq \\ & k_1(u(t)), \quad \|\theta\| \leq k_2 \end{aligned} \quad (13)$$

成立, 其中 $\frac{\partial f(\theta, u(t))}{\partial \theta}$ 是 $f(\theta, u(t))$ 关于 θ 的雅可比矩阵, 则下列自适应诊断算法

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{\theta}(t)}{dt} = & \begin{cases} -\sigma \hat{\theta}(t) - \left(\frac{\partial f(\hat{\theta}(t), u(t))}{\partial \hat{\theta}(t)} \right)^T \varepsilon(t); (\varepsilon(t), \hat{\theta}(t)) \in D_R, \\ -\left(\frac{\partial f(\hat{\theta}(t), u(t))}{\partial \hat{\theta}(t)} \right)^T \varepsilon(t); (\varepsilon(t), \hat{\theta}(t)) \in \bar{D}_R \end{cases} \end{aligned} \quad (14)$$

在有限时间期内确保变量 $(\varepsilon(t), \hat{\theta}(t))$ 以大于 $e^{-\delta t}$ 的指数速率收敛于集合 $\bar{D}_R$, 其中

$$\delta = \min \left\{ \frac{\lambda_{\min}(Q)}{2\lambda_{\max}(P)}, \sigma \right\}, \quad (15)$$

$$\begin{aligned} D_R = \{(\varepsilon(t), \hat{\theta}(t)) \mid & \frac{\lambda_{\min}(P)}{\|C\|^2} \|\varepsilon(t)\|^2 + \\ & \frac{1}{2} \|\hat{\theta}(t)\|^2 > \\ & K_2^2 + \frac{1}{\delta} [\lambda_{\min}(Q) \|Q^{-1}P\|^2 \cdot \\ & (\|B\|^2(k_1^2(u(t)) + \|L\|^2 n_0^2)) + \sigma k_2^2]\}, \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \bar{D}_R = \{(\varepsilon(t), \hat{\theta}(t)) \mid & \frac{\lambda_{\min}(P)}{\|C\|^2} \|\varepsilon(t)\|^2 + \\ & \frac{1}{2} \|\hat{\theta}(t)\|^2 \leq \\ & K_2^2 + \frac{1}{\delta} [\lambda_{\min}(Q) \|Q^{-1}P\|^2 \cdot \\ & (\|B\|^2(k_1^2(u(t)) + \|L\|^2 n_0^2)) + \sigma k_2^2]\}, \end{aligned} \quad (17)$$

且 $\lambda_{\min}(z)$ 与 $\lambda_{\max}(z)$ 表示正定对称矩阵 z 的最小特征值和最大特征值.

证明可参见[5].

上面的自适应估计没有考虑外界干扰, 因此对一些外界干扰存在的系统不合适, 当系统有干扰时, 方程(1)成为:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bf(\theta(t), u(t)) + \Omega(t), \\ y(t) = Cx(t). \end{cases} \quad (18)$$

其中 $\Omega(t) \in \mathbb{R}^n$ 为不可测外界干扰, 并假设存在已知 Ω_0 , 使得

$$\|\Omega(t)\| \leq \Omega_0 < +\infty \quad (19)$$

成立. 在此情况下, 方程(9)应改为:

$$\dot{e}_m(t) = (A + LC)e_m(t) + B(f(\hat{\theta}(t), u(t)) - f(\theta, u(t))) - \Omega(t) \quad (t \geq t_f), \quad (20)$$

而寻找 $\hat{\theta}(t)$ 规律之目的仍为方程(10)成立, 此时唯一的变化是集合 D_R 和 $\bar{D}_R$, 它们应为:

$$D_R = \{(\varepsilon(t), \hat{\theta}(t)) \mid \frac{\lambda_{\min}(P)}{\|C\|^2} \|\varepsilon(t)\|^2 + \frac{1}{2} \|\hat{\theta}(t)\|^2 > k_2^2 + \frac{1}{\delta} [\lambda_{\min}(Q) \|Q^{-1}PB\|^2 k_1^2(u(t) + \lambda_{\min}(Q) \|Q^{-1}P\|^2 \Omega_0^2 + \sigma^2 k_2^2)]\}, \quad (21)$$

$$\bar{D}_R = \{(\varepsilon(t), \hat{\theta}(t)) \mid \frac{\lambda_{\min}(P)}{\|C\|^2} \|\varepsilon(t)\|^2 + \frac{1}{2} \|\hat{\theta}(t)\|^2 \leq k_2^2 + \frac{1}{\delta} [\lambda_{\min}(Q) \|Q^{-1}PB\|^2 k_1^2(u(t) + \lambda_{\min}(Q) \|Q^{-1}P\|^2 \Omega_0^2 + \sigma^2 k_2^2)]\}. \quad (22)$$

4 一个仿真实例(A simulation example)

为了举例说明本文第二节和第三节所提出的算法的有效性, 考虑下面的二阶系统:

$$\dot{x}(t) = \begin{pmatrix} 0.65 & -2.45 \\ 0.3 & -0.9 \end{pmatrix} x(t) + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \tan^{-1}(\theta(t)u(t)) + \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \Omega(t), \quad (23)$$

$$\Omega(t) = 0.01 \sin(10t), \quad (24)$$

$$y(t) = (-3.5 \ 5.5)x(t) + 0.01. \quad (25)$$

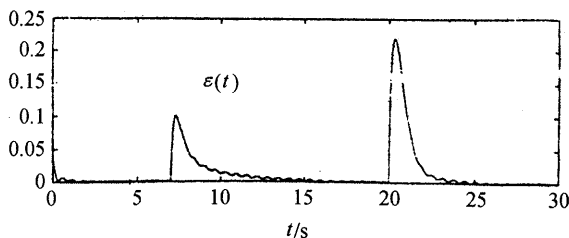


图 1 仿真结果

Fig. 1 Simulation result

该系统在 $t = 0$ 时受制于阶跃输入且方程(5)中的门坎值被置为 0.02. 由此可见, $\hat{\theta}(t)$ 以一种理

其中为了模仿一般执行器中的饱和非线性, 取 $f(\theta(t), u(t)) = \tan^{-1}(\theta(t)u(t))$, 由此可知偶对 (A, C) 是可观测的, 且 $L_d = L = -\begin{pmatrix} 1 \\ 2 \end{pmatrix}$, 选择 P 和 Q 如下:

$$P = \begin{pmatrix} 3 & -3.5 \\ -3.5 & 5.5 \end{pmatrix}; \quad (26)$$

$$Q = \begin{pmatrix} 26.2 & -43.4250 \\ -43.425 & 75.25 \end{pmatrix},$$

使得三元组 $(A + LC, B, C)$ 是严格正实的. 假设 $0.5 \leq |\theta| \leq 2$, 由著名的柯西定理, 可得:

$$f(\theta_1, u(t)) - f(\theta_2, u(t)) = \frac{\partial f(\theta, u(t))}{\partial \theta} \big|_{\theta=\bar{\theta}} (\theta_1 - \theta_2). \quad (27)$$

其中 θ_1 和 θ_2 是闭区间 $[0.5, 2]$ 中任意两个数, $\bar{\theta}$ 与 θ_1, θ_2 有关且也属于 $[0.5, 2]$. 于是可得下面的不等式:

$$\begin{aligned} & |\tan^{-1}(\theta_1 u(t)) - \tan^{-1}(\theta_2 u(t)) - \frac{\partial \tan^{-1}(\theta u(t))}{\partial \theta} \big|_{\theta=\theta_1} (\theta_1 - \theta_2)| = \\ & \left| \frac{u(t)}{1 + (\bar{\theta} u(t))^2} - \frac{u(t)}{1 + (\theta_1 u(t))^2} \right| |\theta_1 - \theta_2| \leq \\ & \frac{2|u(t)|(|\theta_1| + |\theta_2|)}{1 + \min(|\theta_1|, |\theta_2|)^2 u(t)^2} \leq \\ & \frac{4u(t)}{1 + 0.25u(t)^2} \leq \frac{16}{|u(t)|} = k_1(u(t)). \end{aligned} \quad (28)$$

设无故障的执行器有增益 $\theta_H = 1$, 则故障可由下式建立:

$$\theta(t) = \begin{cases} 1, & t < 7 \text{ 秒}, \\ 1.4, & t \geq 7 \text{ 秒}, \\ 0.7, & t > 20 \text{ 秒}. \end{cases} \quad (29)$$

根据第三节提出的原理, 有 $k_2 = 2$ 且 $\sigma = 1, \Omega_0 = 0.01$, 将采样期设置为 0.01, 仿真结果见图 1 和图 2.

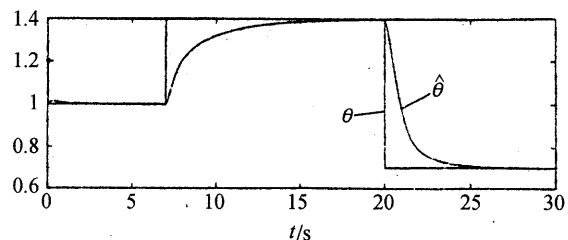


图 2 仿真结果

Fig. 2 Simulation result

想的方式追踪了有故障的执行器的行为. 为了仿真执行器参数的慢变化, 假设系统(23)~(25)的有故

障的执行器由下式给出:

$$\theta(t) = \begin{cases} \theta_H = 1, & t \leq 7 \text{ 秒}, \\ 1 + \frac{0.4}{13}(t - 7), & t > 7 \text{ 秒}, \\ 1.4 - \frac{0.8}{10}(t - 20), & t > 20 \text{ 秒}. \end{cases} \quad (30)$$

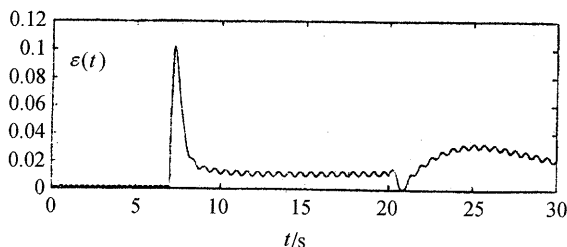


图3 含(30)的系统仿真结果

Fig. 3 Simulation result with (30)

图3和图4显示了含(30)的系统对于检测和诊断作出的应答,可再次诊断到偏差增益故障,而且 $\hat{\theta}(t)$ 有效地跟踪了 $\theta(t)$.

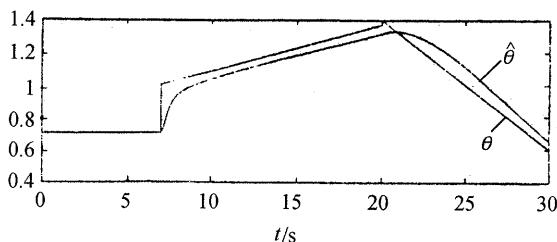


图4 含(30)的系统仿真结果

Fig. 4 Simulation result with (30)

5 结束语(Conclusion)

本文为确定性系统中非线性执行器的检测与诊断提出了一种非线性自适应观测技术.构造了两个可分别用于检测故障和诊断故障的观测器:一个固定的检测观测器和一个自适应的诊断观测器,从而实现了对故障参数的估计.可以看到,在某些假设下,可以得到对一个闭集收敛的估计.为了论证所提出的方法的应用,介绍了一个仿真实例,并且获得了非常理想的结果.

参考文献(References)

- 1 Clark R N. Instrument fault detection. IEEE Trans. Aero. Elec. System, 1978, 14(3): 456 - 465
- 2 Frank P M. Enhancement of robustness in observer-based fault detection. Int. J. Control, 1994, 59(4): 955 - 981

- 3 Isermann R. Process fault diagnosis based on modelling and estimation methods—a survey. Automatica, 1984, 20(3): 387 - 404
- 4 Patton D J, Frank P and Clark R. Fault diagnosis in dynamic systems; theory and application. Series in Syst. Contr. Engg., New Jersey: Prentice Hall International, 1989
- 5 Wang H and Daley S. Actuator fault diagnosis an adaptive observer based approach. IEEE Trans. Automat. Contr., 1996, 41(7): 1073 - 1077
- 6 Landau Y D. Adaptive Control—The Model Reference Approach. New York: Marcel Dekker, 1979
- 7 Narendra K S and Annaswamy A M. Stable Adaptive Systems. Englewood-Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1989

本文作者简介

王爱平 女. 1955年生.工学硕士,副教授.1988年毕业于中国人民解放军国防科学技术大学计算机科学系,毕业后一直从事于计算机专业课的教学工作,曾在国内外杂志发表论文十多篇,出版译著一部,合著一部.

关于举办仿真机器人足球比赛通知

我们拟在1999年中国智能自动化学术会议(1999年10月13日—16日,重庆)举办的同时,举行仿真机器人足球比赛(Simulation League of RoboCup).欢迎各界同仁到会参加或参观比赛.

国际RoboCup比赛每年举办一届,自1997年开始,已经在日本和法国成功地举办了两届.目前共有约22个国家的几千名研究人员在进行相关的工作. RoboCup通过提供一个标准任务,极大地促进了智能机器人与智能化的研究,包括理论、算法、智能体的结构、应用等方面.

通过组织机器人足球比赛,以促进中国人工智能、智能机器人和传感器等相关领域的研究和发展,争取早日在国际RoboCup比赛中取得好成绩.

由于条件的限制,本次比赛只包括仿真比赛.比赛使用Soccerserver 4.21作为Server端,使用的参数与Paris 98比赛完全一致. Server系统和相关的详细介绍可以在如下地址下载:

<http://www.robocup.org/> <http://166.111.68.163/>

我们提供全部的比赛机器,并负责Server程序的安装调试工作,参赛的仿真球队可以在比赛开始前两个小时内安装并调试自己的Client程序.有意参加比赛者,请于九月三十日前和我们联系,以便会议及早安排.

联系人:李实 清华大学计算机系 100084 电话:010-62782266

E-mail: lishi@s1000e.cs.tsinghua.edu.cn