DOI:10.16652/j.issn.1004-373x.2008.04.005

基于特征结构配置的飞控系统故障检测与诊断

宋玉琴[1,2],章卫国[1],仉万江[3]

(1.西北工业大学 自动化学院 陕西 西安 710072;2.西安工程大学 电信学院 陕西 西安 710048;
3.西安电力高等专科学校 陕西 西安 710032)

摘 要:针对具有未知扰动输入的飞行控制系统,运用特征值配置设计了一种用于故障检测和诊断的观测器,他通过对观测器进行左特征向量的配置使得残差与干扰分布方向正交,故障检验残差 r 与未知输入干扰 d 之间的传递函数阵为零,从而使残差与干扰直接解耦。通过这种方法,残差信号得以对干扰具有鲁棒性,使 FDI 算法不受系统不确定性干扰的影响,提高系统故障诊断的可靠性和精度。同时通过残差信号估计故障,能在线辨识故障的形态,仿真结果验证了该方法的有效性。

关键词:故障诊断;特征结构配置;鲁棒性;观测器

中图分类号:TP277 **文献标识码**:B **文章编号**:1004-373X(2008)04-115-03

Fault Detection and Diagnosis Based on Eigenstructure Assignment in Flight Control System

SONG Yuqin[1,2],ZHANG Weiguo[1],ZHANG Wanjiang[3]

(1. College of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, 710072, China;
2. College of Electronics and Information, Xi'an Polytechnical University, Xi'an, 710048, China;
3. Xi'an Electric Power College, Xi'an, 710032, China)

Abstract: The observer of fault detection and diagnosis is designed based on eigenstructure assignment aimed at flight control system having unknown input disturbances. It makes residual in quadrature with disturbances distributed direction through left eigenstructure assignment to observer. The transfer function is zero between fault detection residual r and unknown input disturbance d. So it makes residual decoupling and robust with disturbance. The fault diagnosis and isolation algorithm is not influenced by the system uncertain disturbances. The reliability and precision of fault diagnosis are improved. Meanwhile it can identify faults shape online through residual estimating faults. The simulation results verify method validity.

Keywords: fault diagnosis; eigenstructure assignment; robustness; observer

1 引 言

随着对控制系统可靠性要求的提高,FDI 已成为一个活跃的研究领域。在控制系统 FDI 技术的研究中主要有基于模型和基于知识 2 种途径,其中基于模型的方法是利用控制系统模型内在的解析冗余度构造某种残差,通过对残差的分析与评价实现故障的检测与隔离。由于在绝大多数实际的控制系统中,总是存在或多或少诸如建模误差、噪声干扰等不确定性因素,因此基于模型的故障检测与诊断技术(FDI)对这些不确定性因素的鲁棒性是一个至关重要的问题,并日益引起了人们的重视。鲁棒故障诊断指的就是在建模不确定的情况下,故障诊断系统能在一定程度上区分扰动和故障,仍然以较好的性能诊断出故障。本文针对具有未知扰动输入的飞行控制系统,运用特征值配置设计了一种用于故障检测和诊断的观测器,他通过对观测器进行左特征向量的配置使得残差与干扰分布方向正交。通过这种方法,残差信号得以对干扰具有鲁棒性。最后通过实例在 Matlab 下进行仿真,仿真结果验证了该方法的有效性。

收稿日期:2007-10-11

2 基于特征向量配置故障诊断方法

假设系统的干扰是加性未知输入干扰,形同如下:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \boldsymbol{A}x(t) + \boldsymbol{B}u(t) + \boldsymbol{R}_1 f(t) + \boldsymbol{E}d(t) \\ y(t) = \boldsymbol{C}x(t) + \boldsymbol{D}u(t) + \boldsymbol{R}_2 f(t) \end{cases} \tag{1}$$

式(2)中状态向量 $x(t) \in \boldsymbol{R}^n$;输出向量 $y(t) \in \boldsymbol{R}^m$;已知输入向量 $u(t) \in \boldsymbol{R}^r$;未知输入向量 $d(t) \in \boldsymbol{R}^q$,$f(t) \in \boldsymbol{R}^k$ 表示故障向量的一个关于时间的未知输入。$\boldsymbol{A},\boldsymbol{B},\boldsymbol{C},\boldsymbol{D},\boldsymbol{E}$ 分别是具有相应维数的实数矩阵。矩阵 $\boldsymbol{R}_1$ 和 $\boldsymbol{R}_2$ 为故障分布矩阵,假设已知。矩阵 $\boldsymbol{E}$ 假设为列满秩。

基于全维观测器的残差发生器如图 1 所示,用系统方程式描述如下:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = (\boldsymbol{A} - K\boldsymbol{C})\hat{x}(t) + (\boldsymbol{B} - K\boldsymbol{D})u(t) + Ky(t) \\ \hat{y}(t) = \boldsymbol{C}\hat{x}(t) + \boldsymbol{D}u(t) \\ r(t) = \boldsymbol{Q}[y(t) - \hat{y}(t)] \end{cases} \tag{2}$$

这里 $r \in \boldsymbol{R}^p$ 是残差向量,$\hat{x}$ 和 $\hat{y}$ 为状态和输出估计值。矩阵 $\boldsymbol{Q} \in \boldsymbol{R}^{p\times m}$ 为残差加权向量。这里需要说明的是,因为残差是输出估计误差的线性变换,故残差维数 p 不能大于输出维数 m。这是因为线性相关的残差元素并不能提供更多有用的诊断信息。

把公式(2)所描述的残差产生器应用于式(1)表示的系统,此时状态估计误差 $e(t)=x(t)-\hat{x}(t)$,则残差由下列式子决定:

$$\begin{cases}\dot{e}(t)=(\boldsymbol{A}-\boldsymbol{KC})e(t)+\boldsymbol{E}d(t)+\boldsymbol{R}_1 f(t)-\boldsymbol{KR}_2 f(t)\\ r(t)=\boldsymbol{H}e(t)+\boldsymbol{QR}_2 f(t)\end{cases} \tag{3}$$

这里 $\boldsymbol{H}=\boldsymbol{QC}$。对故障和干扰引起的残差响应进行拉普拉斯变换得:

$$r(s)=\boldsymbol{QR}_2 f(s)+\boldsymbol{H}(s\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}+\boldsymbol{KC})^{-1}(\boldsymbol{R}_1-\boldsymbol{KR}_2) f(s)+\boldsymbol{H}(s\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}+\boldsymbol{KC})^{-1}\boldsymbol{E}d(s) \tag{4}$$

从式(4)可以看出,即使系统不发生故障,残差信号 r 也不可能为 0。实际上,要把干扰项和故障对残差造成的影响区分出来不是很容易。由于干扰项的影响,将导致故障检测算法灵敏度下降,还可能引起虚警。为了避免这些现象的发生,需要设计一个残差信号使得他与干扰直接解耦。

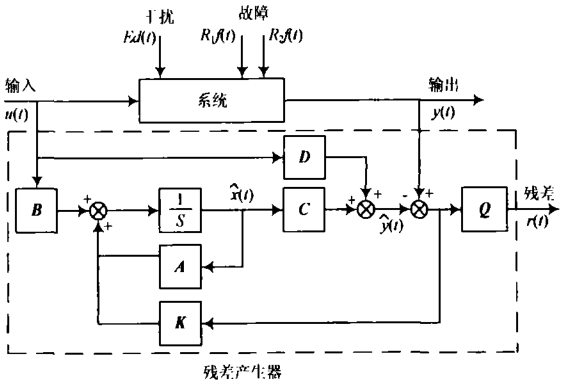

图 1　全维观测器残差发生器

为了使残差向量 r 与未知输入干扰 d 不相关,可令残差向量 r 与未知输入干扰 d 之间的传递函数矩阵为零,即:

$$\boldsymbol{G}_{rd}=\boldsymbol{QC}(s\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}+\boldsymbol{KC})^{-1}\boldsymbol{E}d(s)=0 \tag{5}$$

这是一个零输出问题的特例,如果 $\boldsymbol{E}$ 矩阵已知,剩下的问题就是如何选择矩阵 $\boldsymbol{Q}$ 和 $\boldsymbol{K}$,使得式(5)成立。传递函数阵通过泰勒级数展开得:

$$\begin{aligned}\boldsymbol{G}_{rd}(s)&=\boldsymbol{H}(s\boldsymbol{I}-\boldsymbol{A}_c)^{-1}\boldsymbol{E}\\ &=\boldsymbol{H}[a_1(s)\boldsymbol{I}_n+a_2(s)\boldsymbol{A}_c+\cdots+a_n(s)\boldsymbol{A}_c^{\,n-1}]\boldsymbol{E}\\ &=[a_1(s)\boldsymbol{I}_p\quad a_2(s)\boldsymbol{I}_p\quad\cdots\quad a_n(s)\boldsymbol{I}_p]\cdot\end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix}\boldsymbol{H}\\ \boldsymbol{HA}_c\\ \vdots\\ \boldsymbol{HA}_c^{\,n-1}\end{bmatrix}\boldsymbol{E}=\boldsymbol{H}[\boldsymbol{E}\quad \boldsymbol{A}_c\boldsymbol{E}\cdots\boldsymbol{A}_c^{\,n-1}\boldsymbol{E}]\begin{bmatrix}a_1(s)\boldsymbol{I}_q\\ a_2(s)\boldsymbol{I}_q\\ \vdots\\ a_3(s)\boldsymbol{I}_q\end{bmatrix} \tag{6}$$

这里的 $\boldsymbol{A}_c=\boldsymbol{A}-\boldsymbol{KC}$,$a_1(s),\cdots,a_n(s)$ 是 s 的函数。从以上关系易知,要使 $\boldsymbol{G}_{rd}=0$,可通过满足以下 2 个途径实现:

(1) 如果$(\boldsymbol{H},\boldsymbol{A}_c)$ 的不变子空间位于 $\boldsymbol{E}$ 的左零空间之内,则式(5) 成立;

(2) 如果$(\boldsymbol{A}_c,\boldsymbol{E})$ 的不变子空间位于 H 的右零空间之内,则式(5) 成立。

本文是采用特征结构配置来满足式(5) 的要求,引用 2 个定理。

定理 1[1] $\boldsymbol{G}_{rd}=0$ 的必要条件为 $\boldsymbol{QCE}=0$。

若 $\boldsymbol{CE}=0$,则任取一个加权矩阵 $\boldsymbol{Q}$ 都能满足这个必要条件。但这种情况并不多见。广义上说,要使干扰分布矩阵 $\boldsymbol{E}$ 的列数不能大于 $\boldsymbol{C}$ 阵的独立不相关行数来满足这个必要条件,也就是说能进行解耦的独立干扰数不能大于独立的输出数。如果此条件无法满足,则应考虑最优解耦。

$\boldsymbol{QCE}=0$ 的一个通解由下式给出:

$$\boldsymbol{Q}=\boldsymbol{Q}_1[\boldsymbol{I}_m-\boldsymbol{CE}(\boldsymbol{CE})^{+}]$$

这里 $\boldsymbol{Q}_1\in\boldsymbol{R}^{p\times m}$ 为一任取的矩阵,$(\boldsymbol{CE})^{+}$ 是 $\boldsymbol{CE}$ 的伪逆,当 $\boldsymbol{CE}$ 的秩为 p,则 $\boldsymbol{CE}$ 的伪逆为:

$$(\boldsymbol{CE})^{+}=[(\boldsymbol{CE})^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{CE})]^{-1}(\boldsymbol{CE})^{\mathrm{T}}$$

满足 $\boldsymbol{QCE}=0$ 的 $\boldsymbol{Q}$ 的最大不相关行数为 $m-\mathrm{rank}(\boldsymbol{CE})$。因为线性相关的行并不能提供更多有用的诊断信息,故残差加权矩阵 $\boldsymbol{Q}$ 的行数一般取:$p=m-\mathrm{rank}(\boldsymbol{CE})\leqslant m$。

现通过左特征结构进行配置来达到与干扰直接解耦,其思想是通过对观测器的特征向量配置,使其与干扰分布矩阵 $\boldsymbol{E}$ 的所有列正交。这种方法可总结为如下定理:

定理 2[1] 满足与干扰解耦式(5)成立的充分条件如下:

(1) $\boldsymbol{QCE}=0$;

(2) $\boldsymbol{H}=\boldsymbol{QC}$ 的所有行向量均为$(\boldsymbol{A}-\boldsymbol{KC})$ 对应于任意特征值的左特征向量。

证明:根据条件(2),构造 $\boldsymbol{H}$ 如下:

$$\boldsymbol{H}=[l_1,l_2,\cdots,l_p]^{\mathrm{T}}$$

这里假设 $l_i^{\mathrm{T}}(i=1,2,\cdots,n)$ 为$(\boldsymbol{A}-\boldsymbol{KC})$ 的左特征向量。可得:

$$\boldsymbol{H}v_i=0\qquad(i=p+1,\cdots,n)$$

这里假设 $v_i(i=1,2,\cdots,n)$ 为$(\boldsymbol{A}-\boldsymbol{KC})$ 的右特征向量。根据定理 2 的条件 1 可得:

$$l_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{E}=0,i=1,2,\cdots,p$$

则干扰对残差的传递函数阵:

$$\boldsymbol{G}_{rd}(s)=\sum_{i=1}^{n}\frac{(\boldsymbol{H}v_i)l_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{E}}{s-\lambda_i}=\sum_{i=1}^{p}\frac{\boldsymbol{H}v_i(l_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{E})}{s-\lambda_i}=0$$

3　算法步骤

用左特征结构配置方法对干扰进行解耦进而产生残差的具体设计算法如下:

(1) 计算残差加权矩阵 $\boldsymbol{Q}$,使得 $\boldsymbol{QCE}=0$;

(2) 确定观测器的特征结构:按照希望动态残差性质选取合适的特征值,并保证 $\boldsymbol{QC}$ 的行均为观测器的 p 个左特征向量,其余的$(n-p)$ 左特征矢量的选择则可以产生好的诊断效果为准。以上阐述运用左特征向量配置对干扰直接解耦的理论和设计方法,若左特征矢量的配置条件不易满足,还可以考虑进行观测器的右特征矢量的配置。

4　系统设计和仿真

某飞机纵向小扰动运动方程为：

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU + Ed \\ Y = CX + f_s \end{cases} \tag{7}$$

其中：$X = [\alpha \quad \omega_z \quad \vartheta \quad h]^{\mathrm{T}}$；$Y = [\alpha \quad \omega_z \quad \theta \quad \vartheta \quad h]^{\mathrm{T}}$；$U = [\delta_p \quad \delta_z]^{\mathrm{T}}$；$\alpha(t)$ 表示迎角改变量；$\omega_z(t)$ 表示俯仰速率改变量；$\theta(t)$ 表示航迹倾斜角改变量；$\vartheta(t)$ 表示俯仰角改变量；$h(t)$ 表示高度的改变量；$\delta_z(t)$ 表示升降舵偏转角改变量；$\delta_p(t)$ 表示油门杆改变量；$d = \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ d_3 \end{bmatrix}$ 为干扰信号，d_1, d_2, d_3 为互不相关的随机干扰；f_s 代表传感器故障信号。$\boldsymbol{A}, \boldsymbol{B}, \boldsymbol{C}, \boldsymbol{E}$ 为已知矩阵，其中：$\boldsymbol{E} = \begin{bmatrix} 0.5 & 1 & 0.8 \\ 2 & 3 & 0 \\ 0 & 1.2 & 1 \\ 1 & 2 & 1.5 \end{bmatrix}$

构造状态观测器：

$$\begin{cases} \dot{\hat{X}} = (A - KC)\hat{X} + BU + KY \\ \hat{Y} = C\hat{X} \end{cases}$$

定义残差信号：

$$r = Q(Y - \hat{Y})$$

根据 $QCE = 0$，计算残差加权矩阵 Q 为：

$$Q = \begin{bmatrix} -0.4338 & 0.0045 & -0.6307 & 0.6344 & -0.1075 \\ -0.7798 & -0.0229 & 0.2117 & -0.2308 & 0.5415 \end{bmatrix}$$

显然：

$$H = QC = \begin{bmatrix} 0.1969 & 0.0045 & 0.0038 & -0.1075 \\ -0.9915 & -0.0229 & -0.0191 & 0.5415 \end{bmatrix}$$

为了简便，取 $\boldsymbol{A} - \boldsymbol{KC} = 3\boldsymbol{I}_{4\times4}$，即观测器的闭环极点全部为 −3，求得：

$$K = \begin{bmatrix} -3.0081 & 1.0000 & 1.5041 & -1.5041 & 0 \\ -5.2734 & -6.0241 & 2.6367 & -2.6367 & 0 \\ -1 & 1 & -1 & -2 & 0 \\ -90.7467 & 0 & 181.4933 & 90.7467 & -3 \end{bmatrix}$$

这样做的优点在于 $\boldsymbol{Q}$ 取值的改变不会影响 $\boldsymbol{K}$ 的取值。

根据计算结果，建立系统 Simulink 仿真模型，在传感器发生卡死和恒偏差故障时，输出残差波形如图 2，图 3 所示。

图 2 是系统传感器在 26 s 时发生卡死故障时的残差输出，从图 2 中可以看出即使系统存在扰动输入，但采用特征向量配置的方法将干扰解耦后，残差信号并没有被扰动所淹没，仍然能有效监测出故障的产生。图 3 是传感器在 20 s 时发生了偏差为 0.01 的恒偏差故障，从仿真波形上可以看到，故障诊断效果良好。

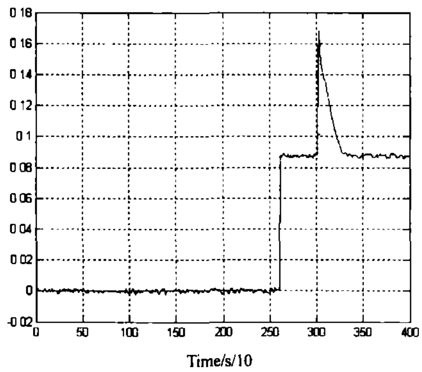

图 2　传感器卡死故障时输出残差信号

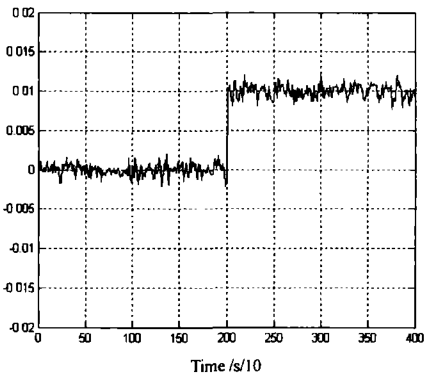

图 3　传感器恒偏差故障输出残差信号

针对控制系统存在干扰的情况下，研究鲁棒故障检测残差的一种设计方法。通过对特征向量的配置，使故障检验残差 r 与未知输入干扰 d 之间的传递函数阵为零，从而使残差与干扰直接解耦，达到 FDI 算法不受系统不确定性干扰的影响。本文给出该方法的原理和设计步骤，最后针对存在噪声干扰的飞控系统进行诊断系统的设计，仿真结果证明该方法的有效性。

参 考 文 献

[1] Jie Chen, Ron J Patton. Robust Model - Based Fault Diagnosis for Dynamic Systems[M]. 北京：清华大学图书馆.

[2] Rolf Isermann. Model - based Fault - detection and Diagnosis - status and Applications[J]. Annual Reviews in Control, 2005, 29: 71 - 85.

[3] Commault C, Dion J W, Sename O, *et al*. Observer - Based Fault Detection and Isolation for Structured SystemsTR[J]. IEEE Ansactions on Automatic Control, 2002, 47(12): 2 074 - 2 078.

[4] 李令莱，周东华. 基于解析模型的非线性系统鲁棒故障诊断方法综述[J]. 信息与控制，2004，33(4)：451 - 455.

[5] 张若青，沈现军，裘丽华. 飞机余度舵机系统鲁棒故障诊断[J]. 控制理论与应用，2001，18(2)：205 - 209.

作者简介　宋玉琴　女，1972 年出生，安徽合肥人，西安工程大学讲师，西北工业大学在读博士研究生。研究方向为故障诊断与容错控制、智能控制、嵌入式系统等。