一种异类系统中多种故障检测与隔离的空间几何方法研究

侯彦东 [1] 程前帅 [1] 胡振涛 [1] 金 勇 [1]

摘 要 针对量测干扰下一种异类过驱动系统中残差与干扰存在耦合关系的问题, 提出一种运用空间几何方法实现残差对干扰解耦的新算法. 通过设计残差生成器并实现残差对系统输入和量测干扰的解耦, 由残差值反馈故障检测情况, 根据不可观测子空间中的空间分割建立结构化残差集, 使得残差集与故障集满足完全对应关系, 完成故障的隔离. 最后通过提出对比仿真算例验证了我们所提算法的可行性和有效性.

关键词 故障检测与隔离, 过驱动系统, 量测干扰, 空间几何方法, 不可观测子空间

引用格式 侯彦东, 程前帅, 胡振涛, 金勇. 一种异类系统中多种故障检测与隔离的空间几何方法研究. 自动化学报, 2015, **41**(6): 1113−1122

DOI 10.16383/j.aas.2015.c140801

Research on Space Geometry Method of Fault Detection and Isolation for a Kind of Abnormal System

HOU Yan-Dong[1] CHENG Qian-Shuai[1] HU Zhen-Tao[1] JIN Yong[1]

Abstract Aiming at the problem of coupling between residuals and disturbances in a kind of abnormal overactuated system under measurement disturbances, this paper presents a novel algorithm based on space geometry approach to achieve the decoupling of residuals from disturbances. Through designing a proper residual generator and implementing the decoupling of the residuals from system inputs and measurement disturbances, the residuals reflect the fault detection status. By applying space division to the unobservability subspace, the structured residual set is established, which is exactly corresponding to fault set, and therefore the fault isolation is achieved. Finally, simulation examples show the feasibility and effectiveness of the presented algorithm.

Key words Fault detection and isolation, overactuated system, measurement disturbance, space geometry method, unobservability subspace

Citation Hou Yan-Dong, Cheng Qian-Shuai, Hu Zhen-Tao, Jin Yong. Research on space geometry method of fault detection and isolation for a kind of abnormal system. *Acta Automatica Sinica*, 2015, **41**(6): 1113−1122

在日新月异的科技发展潮流中, 现代化自动控制系统的大规模化和复杂化越加明显, 一旦出现故障, 容易引发安全问题, 造成环境污染或人身伤害等事故, 因此这类系统运行的安全可靠性就越发重要[1]. 为保障系统的安全性, 就要解决其故障诊断问题, 故障诊断主要是基于数据和基于模型的方法, 基于模型的方法又可分为状态估计方法、参数估计方法和基于空间几何理论的方法[2−5]. 近年来, 对多输入少输出过驱动系统的研究与日俱增, 在故障诊断领域的研究也取得了丰硕的成果, 且应用在了电力设备[6]、航空航天[7] 等领域. 为实现一类异常系统即过驱动系统的故障诊断, 首先要能够对系统是否出现故障的情况进行检测, 之后在检测的基础上确定出故障产生的原因并进行故障定位, 实现故障隔离并对其处理, 完成故障修复, 使得系统的运行具有稳定性. 在故障检测过程中, 容易出现故障检测时延和误报、漏报情况. 在大规模铁路维护设备的故障检测中, 文献 [8] 运用无线传感器网络完成硬件设计, 低成本、高效率地实现了故障检测中的数据采集并传送给故障诊断系统进行处理. 在文献 [9] 中, He 等针对离散时间网络系统未知的输入和多样的状态延时, 建立一种新的量测模型, 用来表示任意时延和随机数据丢失现象, 实现了系统的鲁棒性故障检测. 然而, 仅仅实现系统的故障检测是不够的, 还要对系统故障实现隔离, 完成故障诊断. 为此, Arogeti 等针对单一参数故障, 并利用已知动态模型对混杂系统进行故障检测与隔离[10]. 文献 [11] 则通过同步干扰随机逼近方法来确定神经网络训练样本, 运用贝叶斯网络评估残差来实现故障的检测与隔离. 对以

收稿日期 2014-11-20 录用日期 2015-02-16
Manuscript received November 20, 2014; accepted February 16, 2015
国家自然科学基金 (61374134, 61174112, 61473159, 61333005) 资助
Supported by National Natural Science Foundation of China (61374134, 61174112, 61473159, 61333005)
本文责任编委 文成林
Recommended by Associate Editor WEN Cheng-Lin
1. 河南大学图像处理与模式识别研究所 开封 475004
1. Institute of Image Processing and Pattern Recognition, Henan University, Kaifeng 475004

上情况, 均未对多组残差与多组故障的对应关系进行探讨. 文献 [12] 则提出了一种基于特征结构分配框架观测器的新方法, 对结构化残差形成进行研究, 表明观测器和等价空间设备在残差形成过程中为等价关系, 并通过结构化残差使得残差与故障对应起来. 文献 [13] 建立了卡死、增益时变和偏差时变三种传感器故障模型, 在结构化残差的基础上, 利用空间几何方法以及对残差集与故障集设定对应关系对系统中多传感器故障进行检测与隔离, 但并未考虑量测干扰的情况. 与文献 [14] 的方法对比, 它仅仅考虑了解决单一执行器故障检测与隔离的问题. 本文针对一种异类系统, 即过驱动系统, 考虑系统存在随机量测干扰的情况, 基于空间几何理论构造并求解残差生成器, 建立结构化残差, 实现残差仅对特有故障可观测, 而对其他故障实现解耦. 该算法可实现执行器故障对输入和量测干扰的解耦, 使得输入和量测干扰都不由残差反映, 最终完成系统的单一故障和多个故障的检测与隔离. 最后通过实例仿真验证了所提算法的有效性.

1 问题描述

考虑正常情形下的线性时不变系统:

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t) = A\boldsymbol{x}(t) + B\boldsymbol{u}(t) \tag{1}$$

$$\boldsymbol{y}(t) = C\boldsymbol{x}(t) \tag{2}$$

其中, $\boldsymbol{x} \in \mathbf{R}^n$ 为系统状态变量, $\boldsymbol{u} \in \mathbf{R}^m$ 为系统正常时的输入信号, $\boldsymbol{y} \in \mathbf{R}^q$ 为系统正常时的输出信号, $A \in \mathbf{R}^{n\times n}$ 为系统矩阵, $B \in \mathbf{R}^{n\times m}$ 为输入矩阵, $C \in \mathbf{R}^{q\times n}$ 为输出矩阵. 当系统为过驱动, 也就是系统执行器冗余, 并且伴有未知量测干扰的系统方程表述如下:

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t) = A\boldsymbol{x}(t) + B\boldsymbol{u}(t) + \sum_{i=1}^{k} L_i m_i(t) \tag{3}$$

$$\boldsymbol{y}(t) = C\boldsymbol{x}(t) + D_f D(t) \tag{4}$$

其中, m_i 表示第 i 个执行器发生故障, L_i 为对应第 i 个执行器发生故障时的故障特征, 为实现故障建模, L_i 取 B 的第 i 列, 在此, $B = [L_1, L_2, \cdots, L_k]$, D_f 为量测干扰矩阵, $D(t)$ 为未知量测干扰, 且为随机干扰.

在此, 量测干扰可看成是传感器伪故障, 式 (3) 和式 (4) 表示为

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t) = A\boldsymbol{x}(t) + B\boldsymbol{u}(t) + \sum_{i=1}^{k} L_i m_i(t) \tag{5}$$

$$\boldsymbol{y}(t) = C\boldsymbol{x}(t) + \sum_{j=1}^{q} D_{f_j} D_j(t) \tag{6}$$

其中, D_{f_j} 为矩阵 D_f 的第 j 列, $D_j(t)$ 为对应 D_{f_j} 量测干扰, 在此视为伪传感器故障模式, 即第 j 个传感器有故障发生. 第 j 个传感器发生故障可以表示并建模为 $D_j(t) = -\boldsymbol{c}_j\boldsymbol{x}(t)$, 其中, $\boldsymbol{c}_j$ 为矩阵 C 的第 j 列. 传感器故障特征可以通过建模转化成系统输入信号, 即转化为伪执行器故障信号. $\boldsymbol{f}_i$ 为方程 $D_{f_i} = C\boldsymbol{f}_i$ 的解[15], 新的系统状态可以被定义为 $\bar{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{x} + \sum_{j=1}^{q} \boldsymbol{f}_i D_i(t)$, 那么, 系统方程可重写为

$$\dot{\bar{\boldsymbol{x}}}(t) = A\bar{\boldsymbol{x}}(t) + B\boldsymbol{u}(t) + \sum_{i=1}^{k} L_i m_i(t) + \sum_{j=1}^{q} L_j \boldsymbol{m}_j(t) \tag{7}$$

$$\boldsymbol{y}(t) = C\bar{\boldsymbol{x}}(t) \tag{8}$$

其中, $L_j = \begin{bmatrix}\boldsymbol{f}_j & A\boldsymbol{f}_j\end{bmatrix}$, $\boldsymbol{m}_j(t) = \begin{bmatrix}\dot{\boldsymbol{d}}_j(t) & -D_j(t)\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$.

结构化故障检测与隔离问题 (Structured fault detection and isolation problem, SFDIP) 形式上被定义为动态残差生成器, 使得可观测的 $\boldsymbol{u}(t)$ 和 $\boldsymbol{y}(t)$ 作为输入并生成一组残差信号 $r_i(t)$ $(i \in \boldsymbol{p})$, 且具有以下性质: 1) 当系统没有故障发生时, 所有的残差 $r_i(t)$ 都趋近于零. 2) 当第 j 个执行器发生故障时, 对应的残差 $r_i(t)$ $(i \in \boldsymbol{\Omega}_j)$ 对此故障敏感, 而其余的残差 $r_\alpha(t)$ $(\alpha \in \boldsymbol{p} - \boldsymbol{\Omega}_j)$ 对此故障不敏感. 其中, $\boldsymbol{p}$ 为所有残差下标的集合, $\boldsymbol{\Omega}_j$ 为对第 j 个故障敏感的残差的编码集. 第 3.3 节将给出定义. 本文主要针对过驱动系统中执行器发生故障, 且同时存在未知量测干扰的情况, 通过对系统的建模与分析, 实现故障的检测与隔离.

2 量测干扰下的过驱动系统故障检测和隔离

2.1 残差生成器设计

为实现故障的检测与隔离, 关键在于如何构造既能检测出故障, 又能同时将故障有效隔离的残差生成器, 并把输出的残差信号记为 $r(t)$; 然后再使残差信号 $r(t)$ 与预定的允许阈值 ε 相比较, 来判定故障是否已经发生. 鉴于此, 运用线性系统理论中观测器的设计思想, 基于系统 (7) 和 (8), 构建如下全阶观测器:

$$\dot{\boldsymbol{w}}(t) = F\boldsymbol{w}(t) - E\boldsymbol{y}(t) + G\boldsymbol{u}(t) \tag{9}$$

$$r(t) = M\boldsymbol{w}(t) - H\boldsymbol{y}(t) + K\boldsymbol{u}(t) \tag{10}$$

其中, $\boldsymbol{w} \in \mathbf{R}^n$ 为构造观测器的状态变量.

注 1. 在本文中, 我们设计的全阶观测器能够包含所有量测信息的特征, 同时采用全阶观测器可处理执行器故障之间的耦合问题. 然而, 降阶观测器也可能包含系统的关键特征, 我们会在之后的工作中展开对应的研究. 为设计出只对第 m 个故障敏感的残差生成器, 合并式 (7) ∼ (10), 就可以得到:

$$\begin{bmatrix}\dot{\bar{\boldsymbol{x}}}(t)\\ \dot{\boldsymbol{w}}(t)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}A & 0\\ -EC & F\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\bar{\boldsymbol{x}}(t)\\ \boldsymbol{w}(t)+\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}B & \boldsymbol{L}_i^m & \boldsymbol{L}_j^n\\ G & 0 & 0\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\boldsymbol{u}(t)\\ \boldsymbol{m}_i^m(t)\\ \boldsymbol{m}_j^n(t)\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}L_m\\ 0\end{bmatrix}m_m(t) \tag{11}$$

$$r(t)=\begin{bmatrix}-HC & M\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\bar{\boldsymbol{x}}(t)\\ \boldsymbol{w}(t)\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}K & 0 & 0\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\boldsymbol{u}(t)\\ \boldsymbol{m}_i^m(t)\\ \boldsymbol{m}_j^n(t)\end{bmatrix} \tag{12}$$

其中, $\boldsymbol{L}_i^m=[L_1,\ \cdots,\ L_{m-1},\ 0,\ L_{m+1},\ \cdots,\ L_k]$, $\boldsymbol{m}_i^m(t)=[m_1(t),\ \cdots,\ m_{m-1}(t),\ 0,\ m_{m+1}(t),\ \cdots,\ m_k(t)]^{\mathrm{T}}$, $\boldsymbol{L}_j^n=[L_1,\ L_2,\ \cdots,\ L_q]$, $\boldsymbol{m}_j^n(t)=[m_1(t),\ m_2(t),\ \cdots,\ m_q(t)]^{\mathrm{T}}$.

若记 $\bar{\boldsymbol{x}}^e(t)=\begin{bmatrix}\bar{\boldsymbol{x}}(t)\\ \boldsymbol{w}(t)\end{bmatrix}$, $A^e=\begin{bmatrix}A & 0\\ -EC & F\end{bmatrix}$, $B^e=\begin{bmatrix}B & \boldsymbol{L}_i^m & \boldsymbol{L}_j^n\\ G & 0 & 0\end{bmatrix}$, $\boldsymbol{u}^e(t)=\begin{bmatrix}\boldsymbol{u}(t)\\ \boldsymbol{m}_i^m(t)\\ \boldsymbol{m}_j^n(t)\end{bmatrix}$, $L^e=\begin{bmatrix}L_m\\ 0\end{bmatrix}$, $H^e=\begin{bmatrix}-HC & M\end{bmatrix}$, $K^e=\begin{bmatrix}K & 0 & 0\end{bmatrix}$. 则式 (11) 和 (12) 可以进一步表达成更为简洁的形式:

$$\dot{\bar{\boldsymbol{x}}}^e(t)=A^e\bar{\boldsymbol{x}}^{e(}t)+B^e\boldsymbol{u}^e(t)+L^e\boldsymbol{m}_m(t) \tag{13}$$

$$r(t)=H^e\boldsymbol{x}^e(t)+K^e\boldsymbol{u}^e(t) \tag{14}$$

从式 (13) 和 (14) 可以看出, 如何找到适当的参数矩阵 F, E, G, M, H 和 K, 使得输出的残差信号 $\boldsymbol{r}(t)$ 不仅不受输入信号 $\boldsymbol{u}(t)$ 和量测干扰信号 $D(t)$ 的影响, 而且还要满足从 $\boldsymbol{m_m}(t)$ 到 $\boldsymbol{r}(t)$ 为输入可观测的, 是设计所需残差生成器的关键问题.

2.2　求解残差生成器参数矩阵

为实现残差生成器参数矩阵求解, 首先给出几个相关定义、定理和算法.

定义 1. 子空间 $Im\ C=\{\boldsymbol{y}|\boldsymbol{y}=C\boldsymbol{x},\ \boldsymbol{x}\in\mathbf{R}^n\}\subseteq\mathbf{R}^q$ 称为矩阵算子 C 的像空间; 子空间

$$Ker\ C=\{\boldsymbol{x}|C\boldsymbol{x}=0,\ \boldsymbol{x}\in\mathbf{R}^n\}\subseteq\mathbf{R}^n \tag{15}$$

称为矩阵算子 C 的核空间.

定义 2. 设 $\mathcal{L}\subset\mathbf{R}^n$, 若 $\forall\boldsymbol{x}_1,\ \boldsymbol{x}_2\in\mathbf{R}^n$, 若满足 $\boldsymbol{x}_1-\boldsymbol{x}_2\in\mathcal{L}$, 则称 $\boldsymbol{x}_1$ 和 $\boldsymbol{x}_2$ 关于 $\mathcal{L}$ 等价. 由所有等价类 $\hat{\boldsymbol{x}}=\{\boldsymbol{x}_2|\boldsymbol{x}_2\in\mathbf{R}^n,\ \boldsymbol{x}_2-\boldsymbol{x}_1\in\mathcal{L},\ \boldsymbol{x}_1\in\mathbf{R}^n\}$ 为元素构成的集合, 称为商空间 $\mathbf{R}^n/\mathcal{L}$.

定义 3[16]**.** 设映射 $A:\mathbf{R}^n\to\mathbf{R}^n$, 子空间 $\mathcal{W}\subseteq\mathbf{R}^n$, 若满足 $A\mathcal{W}\subseteq\mathcal{W}$, 则称 $\mathcal{W}$ 为 A 的一个不变子空间; 若满足 $A(\mathcal{W}\bigcap Ker\ C)\subseteq\mathcal{W}$, 则称子空间 $\mathcal{W}$ 为一个 $(C,\ A)$ 不变子空间. 对任意给定的 $\mathcal{L}\in\mathbf{R}^n$, 若把 $\underline{\mathcal{W}}(A,\ C,\ \mathcal{L})=\{\mathcal{W}|A(\mathcal{W}\bigcap Ker\ C)\subseteq\mathcal{W},\ \mathcal{W}\subseteq\mathbf{R}^n,\ \mathcal{L}\in\mathcal{W}\}$ 记为包含 $\mathcal{L}$ 所有 $(C,\ A)$ 不变子空间组成的集合, 则任意取 $\mathcal{W}_1,\ \mathcal{W}_2\in\underline{\mathcal{W}}(\mathcal{L})$, 显然有 $\mathcal{L}\in\mathcal{W}_1\bigcap\mathcal{W}_2$ 和 $\mathcal{W}_1\bigcap\mathcal{W}_2\in\underline{\mathcal{W}}(\mathcal{L})$ 成立. 实际上, 有 $A(\mathcal{W}_1\bigcap Ker\ C)\subseteq\mathcal{W}_1$, $A(\mathcal{W}_2\bigcap Ker\ C)\subseteq\mathcal{W}_2$, $A(\mathcal{W}_1\bigcap Ker\ C)\bigcap A(\mathcal{W}_2\bigcap Ker\ C)\subseteq\mathcal{W}_1\bigcap\mathcal{W}_2$, $A(\mathcal{W}_1\bigcap\mathcal{W}_2\bigcap Ker\ C)\subseteq\mathcal{W}_1\bigcap\mathcal{W}_2$.

所以, 对给定包含 $\mathcal{L}$ $(\mathcal{L}\in\mathbf{R}^n)$ 的 $(C,\ A)$ 不变子空间构成的所有集合, 做交运算都为封闭的, 因此此集合必会有下确界, 并把它记为 $\mathcal{W}^*=\inf\ \boldsymbol{W}(A,\ C,\ \mathcal{L})$, 则 $\mathcal{W}^*$ 即为包含 $\mathcal{L}$ 的最小 $(C,\ A)$ 不变子空间. 之后的问题就是求解 $\mathcal{W}^*$.

算法 1[16]**.** 求解子空间 $\mathcal{W}^*$ 的算法步骤如下:

$$\begin{aligned}&\mathcal{Z}_0=\mathcal{L}\\ &\mathcal{Z}_i=\mathcal{L}+A(\mathcal{Z}_{i-1}\bigcap Ker\ C),\quad i\in k\end{aligned} \tag{16}$$

当 $\mathcal{Z}_k=\mathcal{Z}_{k+1}$ $(k\le n)$ 时, 则可得到 $\mathcal{W}^*=\mathcal{Z}_k$.

注 2. 在算法 1 中, $(C,\ A)$ 不变子空间包含了交集运算中的最小不变子空间. 在求解不变子空间的过程中, 每一步的递归计算可使得 $\mathcal{Z}_i$ 的维数至少增加一维, 那么我们可在 $k\le n$ 步内求得不变子空间 $\mathcal{W}^*$, 即算法收敛. 算法 2 情况类似于算法 1, 之后不再赘述. 算法的具体收敛特性可参看文献 [16].

定义 4[17]**.** 如果对一些输出单射 $D:\mathbf{R}^q\to\mathbf{R}^n$ 和测量混合映射 $H:\mathbf{R}^q\to\mathbf{R}^q$, 有 $\mathcal{S}^*=\langle Ker\ HC|A+DC\rangle$, 则称子空间 $\mathcal{S}^*$ 是一个 $(C,\ A)$ 不可观测子空间 (Unobservability subspace, UOS). 其中 $\langle Ker\ C|A\rangle$ 表示 $(C,\ A)$ 不可观测子空间.

算法 2[16]**.** 求解子空间 $\mathcal{S}^*$ 的算法步骤如下:

$$\begin{aligned}&\mathcal{Z}_0=\mathbf{R}^n\\ &\mathcal{Z}_i=\mathcal{W}^*+(A^{-1}\mathcal{Z}_{k-1})\bigcap Ker\ C,\quad i\in k\end{aligned} \tag{17}$$

当 $\mathcal{Z}_k=\mathcal{Z}_{k+1}$ $(k\le n)$ 时, 则可得到 $\mathcal{S}^*=\mathcal{Z}_{k+1}$.

定理 1 给出了基于不可观测子空间概念扩展残

差生成器基本问题 (Extended fundamental problem of residual generation, EFPRG) ($\boldsymbol{\Omega}_i = \{i\}$) 可解的充分必要条件.

定理 1. EFPRG 问题有解的充分必要条件为存在 $(C,\ A)$ 不可观测子空间:

$$\mathcal{S}_i^* = \inf \sigma(A,\ C,\ \sum_{j=1,j\neq i}^{k} \mathcal{L}_i), \quad i \in k \tag{18}$$

此外, $\mathcal{S}_i^* \bigcap \mathcal{L}_i = 0,\ i \in K,\ \mathcal{L}_i$ 取为 $\boldsymbol{b}_i$.

证明. 生成残差 r_i 的主要步骤就是包含故障特征的像需要与 r_i 的不可观测子空间成解耦关系, 然后采用一种合适的方法提取出不可观测子空间部分, 运用的此种方法使得在其他的商空间中这些故障不会出现. 与此目的关联的必要条件就表明了 $\mathcal{L}_i$ 的像不能与 r_i 的不可观测子空间有交集, 所以出现在第 i 个器件中的故障能够在 r_i 中反映出来. □

定理 2. 在过驱动系统中, 可以同时检测和隔离 p 个并发故障, 此时, 对于 b_i 中每 p 个组合 $(b_{i_1},\ \cdots,\ b_{i_p})$ 存在 (C, A) 不可观测子空间

$$\mathcal{S}^*_{i_1\ i_2\ \cdots\ i_p} = \inf \sigma(\sum_{1}^{p} \boldsymbol{b}_{i_j}) \tag{19}$$

此外, $\mathcal{S}^*_{i_1\ i_2\ \cdots\ i_p} \bigcap \boldsymbol{b}_l = 0,\ l \neq i_j,\ j = 1,\ \cdots,\ p.$

证明. 假设以上的不可观测子空间存在, 那么可以生成 $C(m,\ p)$ 个残差 (m 为输入矩阵 B 的列数), 其中, 每一个故障特征能够影响 $C(m-1,\ p)$ 个残差, 同时, 此故障不受另外 $C(m-1,\ p-1)$ 个残差的影响. 令 $r_{i_1\ i_2\ \cdots\ i_p}$ 表示为与 $\boldsymbol{b}_{i_1\ i_2\ \cdots\ i_p}$ 成解耦关系的残差, 无论何时在通道 $\boldsymbol{b}_l$ 中出现故障, 所有的残差 $r_{i_1\ i_2\ \cdots\ i_p}$ 对于某一个 j 正如 $i_j = l$, 能够与此故障解耦, 并且这个故障能够影响其他剩余的残差. 同时对于每一个执行器故障, 存在一个个数为 $C\,(m-1,\ p)$ 的残差组受到该故障的影响, 然后就可以通过观测这些残差来检测故障的发生. 在输入通道 $\boldsymbol{b}_{i_1\ i_2\ \cdots\ i_l}\,(l \leq p)$ 中, 出现并发故障, 残差 $\{i_1,\ i_2,\ \cdots,\ i_l\} \subseteq \{i_1,\ i_2,\ \cdots,\ i_p\}$ 与这些并发故障成解耦关系, 其余的残差能够被其余的故障影响. 因此, 就可以容易地检测到故障通道. □

若一类故障特征满足定理 2, 则被称作 p 可检测类故障特征. 且共可以生成 $C(k,p)$ 个残差.

推论 1. 可检测类的故障特征的必要条件是 $\boldsymbol{b}_i$ 中 $p+1$ 个组合 $(\boldsymbol{b}_{i_1},\ \cdots,\ \boldsymbol{b}_{i_{\boldsymbol{p}}+1})$ 的秩

$$\mathrm{Rank}(\boldsymbol{b}_{i_1},\ \cdots,\ \boldsymbol{b}_{i_{p+1}}) = p+1 \tag{20}$$

推论 1 可以作为检测指标来确定一类故障特征 $\mathcal{L}_i$ 的可检测指数.

2.3 确定故障与残差之间的对应关系

为完成残差生成器参数的求解, 首先讨论故障与残差之间的对应关系.

定义 5. 称 $\boldsymbol{\Omega}_i = \{l | r_l(t) \neq 0, m_i(t)$ 到 $r_l(t)$ 可观测, $l = 1,\ 2,\ \cdots,\ p\}$ 为第 i 个故障的残差指标集, 其中 p 为最大残差个数.

根据实际系统结构的不同, 选取残差指标集也会有所不同. 记 $\boldsymbol{\Omega}_i = \{l_1,\ l_2,\ \cdots,\ l_{q_i}\}$, 其中 $q_i \in \{1,\ 2,\ \cdots,\ p\}$, 当 $\boldsymbol{\Omega}_i = \varphi$ 时, 显然残差信号对第 i 个故障都不敏感, 即此种情况下该故障不可检测. 当 $\boldsymbol{\Omega}_i = \{1,\ 2,\ \cdots,\ p\}$ 时, 则表示每个残差都对第 i 个故障敏感, 但尽管此故障可以被检测出, 却不能实现对它的隔离; 所以, 要完成对并发故障实现检测和隔离, 这就要求残差指标集为非空、唯一且各不相同的. 当 $\boldsymbol{\Omega}_i = \{i\},\ i = 1,\ 2,\ \cdots,\ q$ 时, 则 $p = q$, 残差指标集对应所有的故障非空、唯一且均不相同, 所以此时基于此类残差指标集, 就可以完全实现对并发故障的检测和隔离.

显然, 以上描述的残差指标集为 3 种特殊情形. 考虑一般的情况, 假设有 3 个残差指标集 $\boldsymbol{\Omega}_l$、$\boldsymbol{\Omega}_m$ 和 $\boldsymbol{\Omega}_n$, 其中 $l \neq m,\ m \neq n,\ n \neq l,\ \{l,m,n\} \in \{1,2,\cdots,q\}$. 当 $\boldsymbol{\Omega}_l \bigcap \boldsymbol{\Omega}_m \bigcap \boldsymbol{\Omega}_n = \varphi$ 时, 第 l、m 和 n 个故障则会完全独立, 此时第 l、m 和 n 个并发故障是可以完全被检测的; 当 $\boldsymbol{\Omega}_l = \boldsymbol{\Omega}_m = \boldsymbol{\Omega}_n$ 时, 第 l、m 和 n 个故障则会完全耦合, 此时第 l、m 和 n 个并发故障是都不能被检测的; 当 $\boldsymbol{\Omega}_l \bigcap \boldsymbol{\Omega}_m \bigcap \boldsymbol{\Omega}_n \neq \varphi$, 且各不相同时, 第 l、m 和 n 个并发故障则会有部分耦合, 此时并发故障能否被检测就取决于故障特征的相互独立部分.

2.4 残差生成器矩阵参数求解方法与步骤

在此, 以求解第 i 个残差 $r_i(t)$ 为例. 首先, 根据第 2.2 节中的算法 1 求解得到包含 $\mathcal{L}$ 的 (C,A) 不变子空间 $\mathcal{W}^*$, 之后通过算法 2 求得包含 $\mathcal{L}$ 的 (C,A) 不可观测子空间 $\mathcal{S}^*$, 由此就可得到包含故障特征 $\mathcal{L}$ 的商空间 $\mathbf{R}^n/\mathcal{S}^*$, 实现对故障特征 $\mathcal{L}_i$ 的解耦. 由于 M_i 为方程 $M_iP_i = H_iC$ 的解, 所以需先通过方程 $Ker\ H_iC = \mathcal{S}_i^* + Ker\ C$, 求解得到测量混合映射 $H_i : \mathbf{R}^q \to \mathbf{R}^q$; 然后由 $P_i\mathcal{S}^* = 0$ 可求得状态空间 $\mathbf{R}^n$ 到商空间 $\mathbf{R}^n/\mathcal{S}^*$ 的投影算子 P_i, 即可解得 M_i.

其次, 构造可观测对 (M_i, F_i), 因为 $F_i = A_0 + D_1M_i$, 存在输出映射 D_1 使得 $\sigma(F_i) = \Lambda$, Λ 为任意对称集, 所以先利用不可观测子空间 $\mathcal{S}^*$, 通过对方程 $P_i(A + D_0C)\mathcal{S}^* = 0$ 进行运算, 解得输出映射 $D_0 : \mathbf{R}^q \to \mathbf{R}^n$; 然后通过诱导映射的性质 $P_i(A + D_0C) = (A + D_0C : \mathbf{R}^n/\mathcal{S}_i^*\ )P_i$, 可求得 $A_0 = (A + D_0C : \mathbf{R}^n/\mathcal{S}_i^*\ )$, 由此得到 D_1 和 F_i. 由 $D = D_0 + P_i^{-r}D_1H_i$ 求得 D, 则 $E_i = P_iD$,

$G_i = P_iB$, $K_i = 0$.

最后, 残差生成器 $\boldsymbol{r}_i(t)$ 构造如下:

$$\dot{\boldsymbol{w}}_i(t) = F_i\boldsymbol{w}_i(t) - E_i\boldsymbol{y}(t) + G_i\boldsymbol{u}(t) \tag{21}$$

$$\boldsymbol{r}_i(t) = M_i\boldsymbol{w}_i(t) - H_i\boldsymbol{y}(t) \tag{22}$$

2.5　解耦算法实现及其优点

设误差 $\boldsymbol{e}_i(t) = \boldsymbol{w}_i(t) - P_i\boldsymbol{x}(t)$, 根据系统的方程 (5) 和 (6) 以及方程 (21) 和 (22) 可得:

$$\dot{\boldsymbol{e}}_i(t) = \dot{\boldsymbol{w}}_i(t) - P_i\dot{\boldsymbol{x}}(t) = F_i\boldsymbol{e}_i(t) - E_iD_fD(t) - P_iL_im_i(t) \tag{23}$$

$$\boldsymbol{r}_i(t) = M_i\boldsymbol{w}_i(t) - H_i\boldsymbol{y}(t) = M_i\boldsymbol{e}_i(t) - H_iD_f\boldsymbol{d}(t) \tag{24}$$

由式 (23) 和 (24) 可得, 残差 $\boldsymbol{r}_i(t)$ 对输入成解耦状态, 且仅对故障模式 $m_i(t)$ 敏感, 而对其他故障模式并不敏感. 同时, 当满足 $E_iD_f = 0$ 和 $H_iD_f = 0$ 时, 就能实现残差对量测干扰的完全解耦, 且 $D(t)$ 可为随机干扰.

然而, 本文要实现的就是残差仅受到特有故障的影响, 而与其他故障成解耦关系, 并且输入和干扰都不能影响残差的输出结果. 由此, 满足以上条件就实现了故障的检测与隔离, 此处, 不仅针对单一故障, 而且对多故障的检测与隔离也有很好的效果.

明显地, 文中提出的方法是通过理论推导直接实现残差对故障的敏感性, 同时实现残差对输入和干扰的解耦, 在实现单一执行器故障检测与隔离的基础上, 也可完成多个执行器故障检测与隔离, 而文献 [14] 中算法只能解决单个执行器故障检测与隔离的问题, 且没考虑量测干扰的问题, 所以本文算法较文献 [14] 中的算法具有一定优越性.

3　仿真实验与分析

考虑系统 (3) 和 (4) 中:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 0 & -1 & 2 \\ 2 & 0 & -4 \end{bmatrix},\ B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 2 \end{bmatrix}$$

显然, 系统有 4 个输入通道, $\mathrm{Rank}(B) = 3$, 所以该系统为过驱动系统. 由推论可得 $p = 2$, 即可检测指数为, 所以可以生成 $C(4,2) = 6$ 个残差, 分别为 r_{12}, r_{13}, r_{14}, r_{23}, r_{24}, r_{34}. 并且有 6 个不可观测子空间对应的残差. 表 1 为故障通道与对应残差解耦关系.

表 1　故障通道与对应残差解耦关系

Table 1　The decoupling relationship of fault channels and the corresponding residuals

故障通道	影响残差	解耦残差
F_1	r_{23}, r_{24}, r_{34}	r_{12}, r_{13}, r_{14}
F_2	r_{13}, r_{14}, r_{34}	r_{12}, r_{23}, r_{24}
F_3	r_{12}, r_{14}, r_{24}	r_{13}, r_{23}, r_{34}
F_4	r_{12}, r_{13}, r_{23}	r_{14}, r_{24}, r_{34}
F_1 和 F_2	r_{13}, r_{14}, r_{23}, r_{24}, r_{34}	r_{12}
F_1 和 F_3	r_{12}, r_{14}, r_{23}, r_{24}, r_{34}	r_{13}
F_1 和 F_4	r_{12}, r_{13}, r_{23}, r_{24}, r_{34}	r_{14}
F_2 和 F_3	r_{12}, r_{13}, r_{14}, r_{24}, r_{34}	r_{23}
F_2 和 F_4	r_{12}, r_{13}, r_{14}, r_{23}, r_{34}	r_{24}
F_3 和 F_4	r_{12}, r_{13}, r_{14}, r_{23}, r_{24}	r_{34}

根据第 3.4 节算法步骤, 相关参数求解如下:

$$F_{12} = F_{13} = F_{14} = F_{23} = F_{24} = F_{34} = -10;$$

$$E_{12} = \begin{bmatrix} 6.3639 & 0 & -1.4142 \end{bmatrix}, E_{13} = \begin{bmatrix} 0 & -2 & -2 \end{bmatrix},$$

$$E_{14} = \begin{bmatrix} -9 & -2 & 0 \end{bmatrix},$$

$$E_{23} = \begin{bmatrix} 4.6192 & 12.1254 & -7.5062 \end{bmatrix},$$

$$E_{24} = \begin{bmatrix} -5.774 & 12.1254 & -5.1966 \end{bmatrix},$$

$$E_{34} = \begin{bmatrix} -4.6192 & -14.435 & 5.1966 \end{bmatrix};$$

$$G_{12} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -0.7071 & 0.7071 \end{bmatrix},$$

$$G_{13} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$G_{14} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix}, G_{23} = \begin{bmatrix} 0.5774 & 0 & 0 & 1.1548 \end{bmatrix},$$

$$G_{24} = \begin{bmatrix} 0.5774 & 0 & 1.1548 & 0 \end{bmatrix},$$

$$G_{34} = \begin{bmatrix} -0.5774 & 1.1548 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$M_{12} = 1, M_{13} = 1, M_{14} = 1,$$

$$M_{23} = -1, M_{24} = 0.5222,$$

$$M_{34} = -0.5222; H_{12} = \begin{bmatrix} -0.7071 & 0.7071 & 0 \end{bmatrix},$$

$$H_{13} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, H_{14} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$H_{23} = \begin{bmatrix} 0.5774 & 0.5774 & -0.5774 \end{bmatrix},$$

$$H_{24} = \begin{bmatrix} 0.3015 & -0.9045 & 0.3015 \end{bmatrix},$$

$$H_{34} = \begin{bmatrix} -0.3015 & -0.9045 & 0.3015 \end{bmatrix}.$$

最后可由式 (21) 和 (22) 求得残差值 r_{12}, r_{13}, r_{14}, r_{23}, r_{24}, r_{34}.

为实现由残差值观测到故障发生的目标, 首先选取有效残差阈值 $\varepsilon = \pm 0.05$, 当有残差值超过阈值时则可说明系统有故障发生, 最终通过残差值的结果判定系统中执行器是否有故障发生, 检测到故障之后并对其进行隔离, 保障系统的稳定运行. 对于文献 [14] 中的算法, 我们通过仿真可以实现单个执行器的故障检测与隔离, 但对于多个执行器故障的情况未得到解决, 仿真结果如图 1 和图 2 所示, 分别可由三个残差值对应一种故障情况, 其中在图 2 中 r_1 和 r_3 的曲线重合.

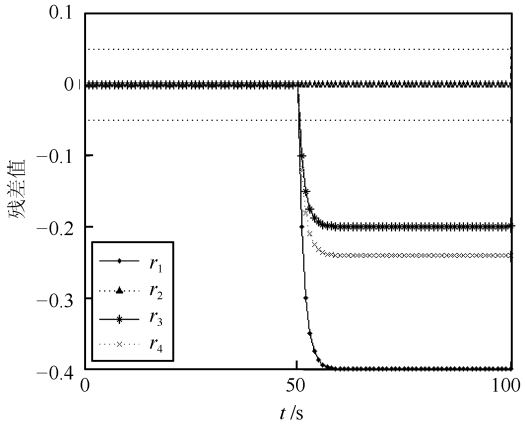


图 1 2 号执行器发生故障

Fig. 1 No. 2 actuator has a fault

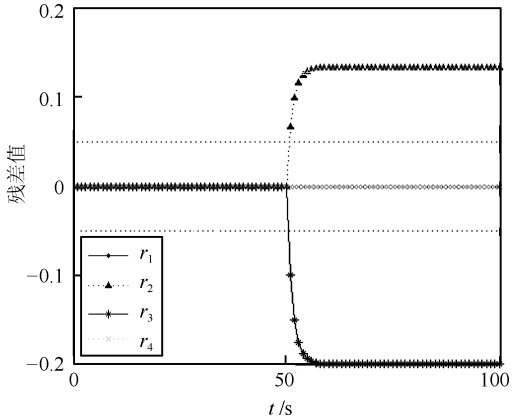


图 2 4 号执行器发生故障

Fig. 2 No. 4 actuator has a fault

在本文的算法中, 首先我们考虑系统中 1 号执行器在 50 s 时刻有故障发生, 但在原始系统的量测输出端伴有量测干扰, 如图 3 所示, 致使输出残差值与量测干扰之间具有耦合关系, 不能由残差值观测到故障的发生. 然后考虑 2 号和 3 号执行器在 50 s 时刻同时发生故障, 如图 4 所示, 但情况与图 3 显示类似, 仍不能由残差值确定具体故障的发生.

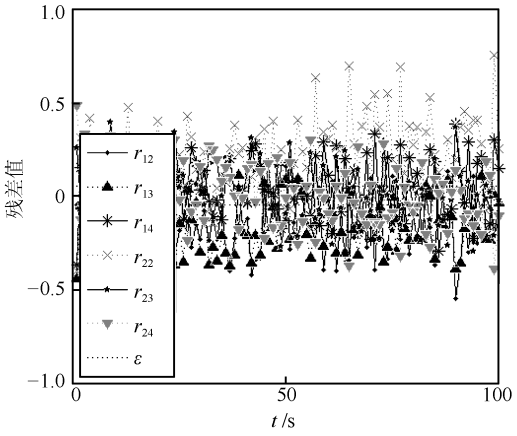


图 3 1 号执行器发生故障未实现残差对干扰解耦

Fig. 3 No. 1 actuator has a fault and residuals are not decoupled from disturbances

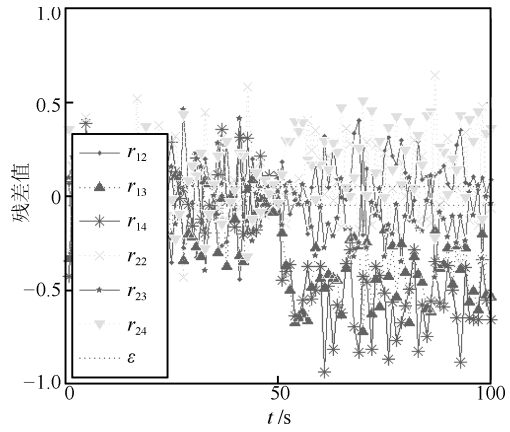


图 4 2、3 号执行器发生故障未实现残差对干扰解耦

Fig. 4 No. 2 and No. 3 actuators have faults and residuals are not decoupled from disturbances

以下几种情形都实现了残差对量测干扰的解耦. 在图 5 中, 我们可以由所有的残差值都始终接近于 0 可知, 系统没有故障发生, 即每个执行器都能正常运行. 在图 6 中, 1 号执行器在 50 s 时刻有微弱故障发生, 但所有的残差值都未超过设定阈值, 即系统都能在阈值范围内正常工作, 在此种情况下, 我们也视作系统没有故障发生.

可由图 7 中残差值 r_{23}, r_{24}, r_{34} 在 50 s 时刻同时发生跳变和表 1 的残差与故障的对应解耦关系可知, 1 号执行器在 50 s 时刻有突发故障产生. 类似地, 通过图 8 ~ 10 中的残差值 r_{13}, r_{14}, r_{34}、r_{12}, r_{14}, r_{24} 和 r_{12}, r_{13}, r_{23} 分别确定出 2 号、3 号和 4 号执行器在 50 s 时刻有突发故障产生. 此类情况为单个跳变故障的检测.

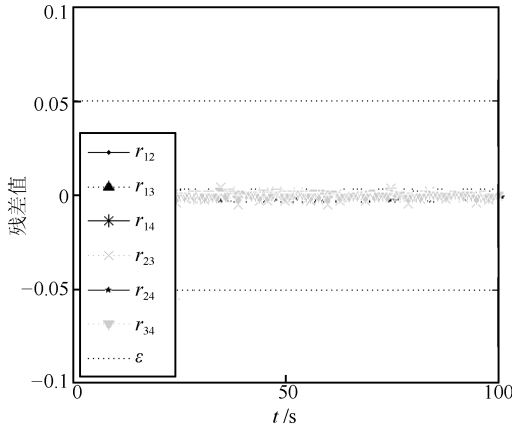


图 5　无执行器发生故障但实现残差对干扰解耦

Fig. 5　No actuator has faults and residuals are decoupled from disturbances

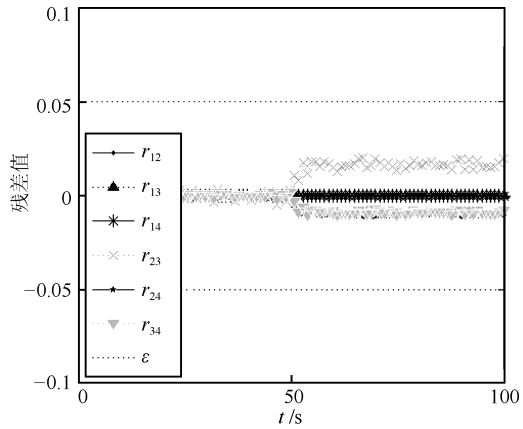


图 6　1 号执行器发生微弱故障并实现残差对干扰解耦

Fig. 6　No. 1 actuator has a weak fault and residuals are decoupled from disturbances

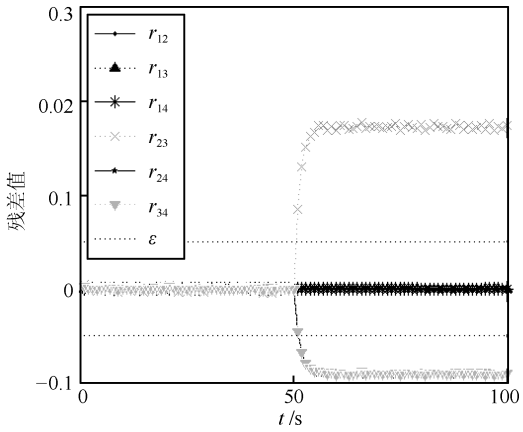


图 7　1 号执行器发生故障并实现残差对干扰解耦

Fig. 7　No. 1 actuator has a fault and residuals are decoupled from disturbances

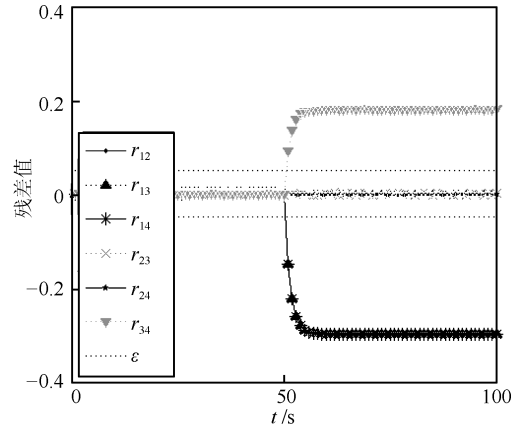


图 8　2 号执行器发生故障并实现残差对干扰解耦

Fig. 8　No. 2 actuator has a fault and residuals are decoupled from disturbances

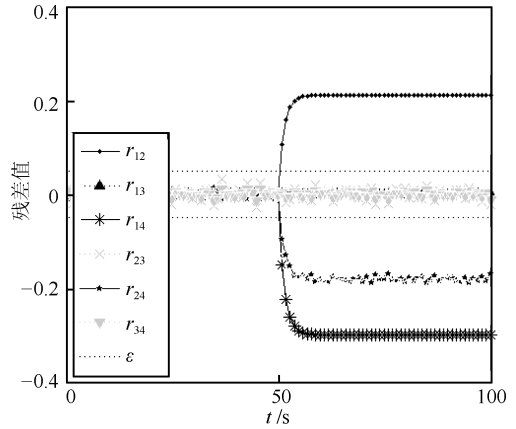


图 9　3 号执行器发生故障并实现残差对干扰解耦

Fig. 9　No. 3 actuator has a fault and residuals are decoupled from disturbances

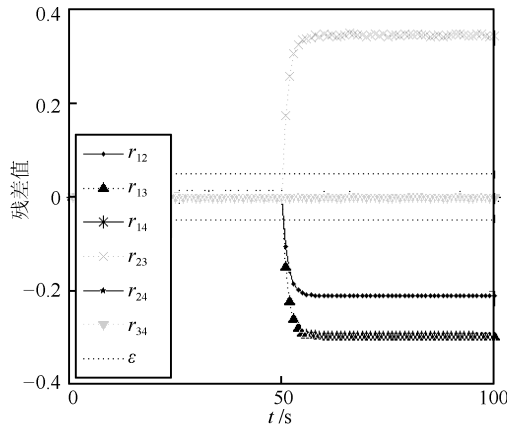


图 10　4 号执行器发生故障并实现残差对干扰解耦

Fig. 10　No. 4 actuator has a fault and residuals are decoupled from disturbances

在图 11 中, 残差值在 50 s 时刻和 70 s 时刻分别发生跳变, 表明 1 号执行器在 50 s 时刻出现突发

故障且在 70 s 时刻出现增益故障. 图 12 情况类似于图 11, 由残差输出值可知, 3 号执行器分别在 50 s 时刻和 70 s 时刻发生突变故障和增益故障.

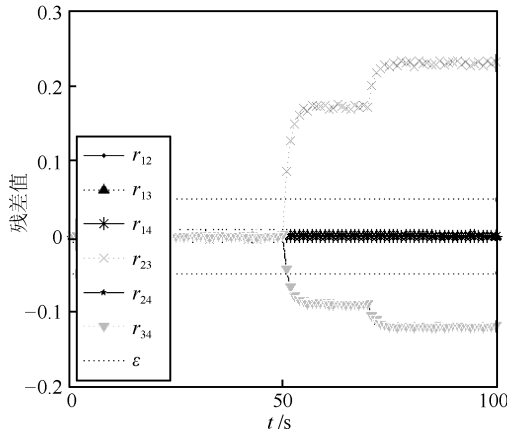


图 11 1 号执行器发生增益故障并实现残差对干扰解耦

Fig. 11 No. 1 actuator has a gain fault and residuals are decoupled from disturbances

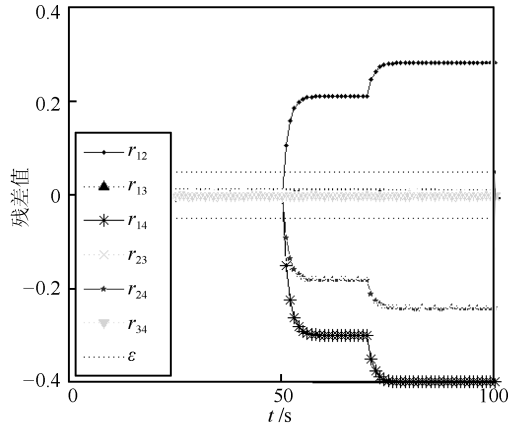


图 12 3 号执行器发生增益故障并实现残差对干扰解耦

Fig. 12 No. 3 actuator has gain a fault and residuals are decoupled from disturbances

基于表 1 和图 13 中残差 r_{12}, r_{13}, r_{14}, r_{24}, r_{34} 在 50 s 时刻同时跳变可知, 2 号和 3 号执行器在 50 s 时刻同时发生故障. 而从图 14 中可得到 2 号和 3 号执行器在 50 s 时刻有突发故障之后, 又在 70 s 时刻发生了增益故障.

图 15 显示, 残差 r_{23}, r_{24}, r_{34} 在 50 s 时刻有跳变发生, 而在 70 s 时刻, 残差 r_{12}, r_{14}, r_{24} 在原来基础上又出现再次跳变, 表明 1 号传感器在 50 s 时刻出现故障, 而 3 号传感器在 70 s 时刻出现故障. 图 16 情况类同于图 15, 表明 4 号传感器在 50 s 时刻出现故障, 而 2 号传感器在 70 s 时刻出现故障.

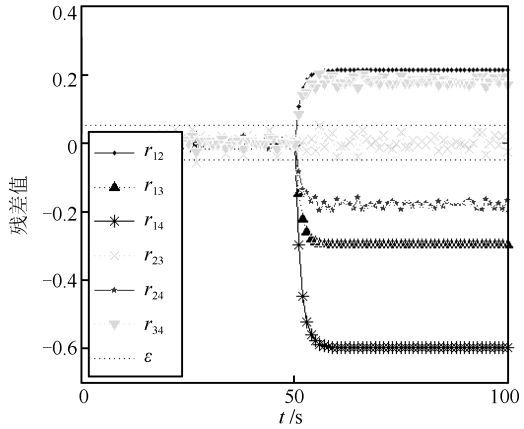


图 13 2、3 号执行器发生故障并实现残差对干扰解耦

Fig. 13 No. 2 and No. 3 actuators have faults and residuals are decoupled from disturbances

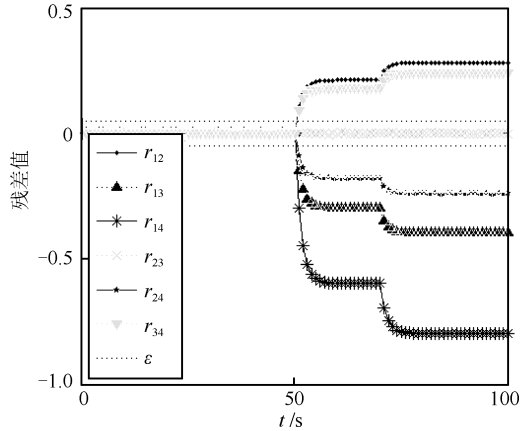


图 14 2、3 号执行器发生增益故障并实现残差对干扰解耦

Fig. 14 No. 2 and No. 3 actuators have gain faults and residuals are decoupled from disturbances

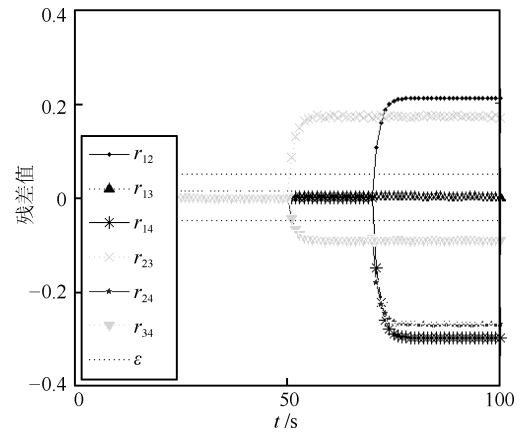


图 15 1、3 号执行器在不同时刻发生故障并实现残差对干扰解耦

Fig. 15 No. 1 and No. 3 actuators have faults at different time and residuals are decoupled from disturbances

由图 3～16 可得出, 在实现残差与输入解耦的关系下, 由残差值观测故障的发生与否. 首先在残差

对量测干扰不解耦的情况下, 无法从残差输出值观测出故障是否发生以及故障发生的时刻. 然后对于残差对量测干扰解耦的情景, 能够实现单个故障的检测, 继而实现故障隔离, 并且也能实现并发故障的检测与隔离. 之后不仅可以检测到单个或并发的突变故障, 而且也可以检测到增益故障. 最后可完成不同故障在不同时刻发生的检测与隔离.

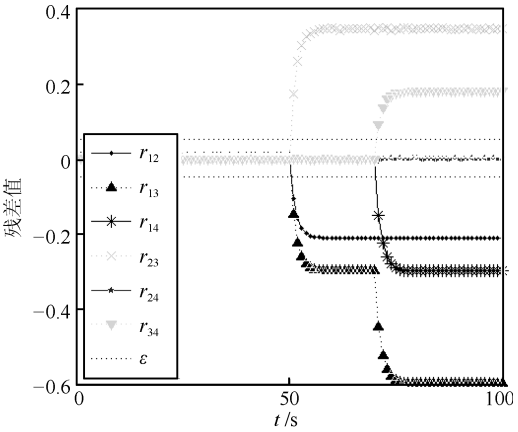


图 16　2、4 号执行器在不同时刻发生故障并实现残差对干扰解耦

Fig. 16　No. 2 and No. 4 actuators have faults at different time and residuals are decoupled from disturbances

4　结论

本文针对存在量测干扰的一种异类过驱动系统, 当执行器发生故障时对系统进行模型建立. 结合线性系统理论, 构造合适的残差生成器进行故障检测和隔离; 利用空间几何理论中的不变子空间理论, 通过特征空间分割, 实现了故障特征的解耦; 在伴有随机量测干扰的情况下, 通过空间投影运算, 实现系统对输入和量测干扰的完全解耦; 仿真结果表明, 该方法不仅实现了对伴有量测干扰的单故障的检测和隔离, 并对伴有量测干扰的多故障实现了检测和隔离. 因此, 本文提出的方法不仅具有较强的理论意义, 同时具有较好的实用价值.

References

1 Zhou Dong-Hua, Ye Yin-Zhong. *Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control*. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.
(周东华, 叶银忠. 现代故障诊断与容错控制. 北京: 清华大学出版社, 2000.)

2 Zhou Dong-Hua, Shi Jian-Tao, He Xiao. Review of intermittent fault diagnosis techniques for dynamic systems. *Acta Automatica Sinica*, 2014, **40**(2): 161−171
(周东华, 史建涛, 何潇. 动态系统间歇故障诊断技术综述. 自动化学报, 2014, **40**(2): 161−171)

3 Hu J, Wen C L, Li P, Yuan T Q. Direct projection to latent variable space for fault detection. *Journal of the Franklin Institute*, 2014, **351**(3): 1226−1250

4 Qiu A B, Jiang B, Wen C L, Mao Z H. Fault estimation and accommodation for networked control systems with nonuniform sampling periods. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 2014, DOI: 10.1002/acs.2481

5 Meskin N. Fault Detection and Isolation in a Networked Multi-vehicle Unmanned System [Ph. D. dissertation], Concordia University, Canada, 2008.

6 Wang R R, Wang J M. Passive actuator fault-tolerant control for a class of overactuated nonlinear systems and applications to electric vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2013, **62**(3): 972−985

7 Patel D, Frank D, Crane C. Controlling an overactuated vehicle with application to an autonomous surface vehicle utilizing azimuth thrusters. In: Proceedings of the 14th IEEE International Conference on Control, Automation and Systems. Seoul, Korea: IEEE, 2014. 745−750

8 Yu J F, Yang L, Wang H R. Fault detection for large-scale railway maintenance equipment base on wireless sensor networks. *Sensors and Transducers*, 2014, **169**(4): 165−169

9 He X, Wang Z D, Zhou D H. Robust fault detection for networked systems with communication delay and data missing. *Automatica*, 2009, **45**(11): 2634−2639

10 Arogeti S A, Wang D W, Low C B. Mode identification of hybrid systems in the presence of fault. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, **57**(4): 1452−1467

11 Cho H C, Knowles J, Fadali M S, Lee K S. Fault detection and isolation of induction motors using recurrent neural networks and dynamic Bayesian modeling. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2010, **18**(2): 430−437

12 Jean F M, Philippe M. On residual generation by observer and parity space approaches. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1994, **39**(2): 441−447

13 Hou Yan-Dong, Wen Cheng-Lin, Chen Zhi-Guo. Designing method of residual generator for multi-sensor fault detection and isolation. *Acta Electronica Sinica*, 2011, **39**(2): 429−434
(侯彦东, 文成林, 陈志国. 多传感器故障检测与隔离的残差产生器设计方法研究. 电子学报, 2011, **39**(2): 429−434)

14 Sobhani M H, Poshtan J. Observer-based fault detection and isolation of three-tank benchmark system. In: Proceedings of the 2nd IEEE International Conference on Control, Automation and Systems. Shiraz, Iran: IEEE, 2011. 759−763

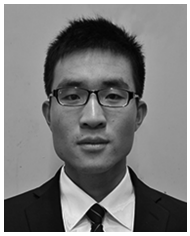
15 Chung W H, Speyer J L. A game theoretic fault detection filter. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1998, **43**(2): 143−161

16 Basile G, Marro G. Controlled and conditioned invariant subspaces in linear system theory. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 1969, **3**(5): 306−315

17 Massoumnia M A. A geometric approach to the synthesis of failure detection filters. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1986, **31**(9): 839−846



侯彦东 河南大学副教授. 2010 年获得上海海事大学电力电子与电力传动专业博士学位. 主要研究方向为复杂系统故障诊断和安全预测. 本文通信作者.
E-mail: hydong@henu.edu.cn
(**HOU Yan-Dong** Associate professor at Henan University. He received his Ph. D. degree in power electronics and power transmission from Shanghai Maritime University in 2010. His research interest covers fault diagnosis and safety prediction in complex systems. Corresponding author of this paper.)



程前帅 2011 年获得安阳工学院工学学士学位, 2014 年获得河南大学工学硕士学位. 主要研究方向为故障诊断.
E-mail: hndxcqs@163.com
(**CHENG Qian-Shuai** Received his bachelor degree in electrical and information engineering from Anyang Institute of Technology in 2011 and master degree in pattern recognition and intelligent system from Henan University in 2014. His main research interest is fault diagnosis.)



胡振涛 河南大学副教授. 2010 年获得西北工业大学控制科学与工程专业获得博士学位. 主要研究方向为复杂系统建模与估计, 目标跟踪和粒子滤波.
E-mail: hzt@henu.edu.cn
(**HU Zhen-Tao** Associate professor at Henan University. He received his Ph. D. degree in control science and engineering from Northwestern Polytechnical University in 2010. His research interest covers complex system modeling and estimation, target tracking and particle filter.)



金 勇 河南大学计算机信息与工程学院副教授. 1994 年获得同济大学电气工程专业理学学士学位, 2010 年获得西北工业大学信息与通信工程博士学位. 主要研究方向为阵列信号处理与统计信号处理. E-mail: jy@henu.edu.cn
(**JIN Yong** Associate professor at the College of Computer and Information Engineering, Henan University. He received his bachelor degree in electrical engineering from Tongji University in 1994 and Ph. D. degree in information and communication engineering from Northwestern Polytechnical University in 2010. His research interest covers array signal processing and statistical signal processing.)