

文章编号: 1000-8055(2009)08-1872-06

关系矩阵法在发动机执行机构故障检测中的应用

陶文华, 叶志锋

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 作为航空发动机控制系统的重要组成部分, 执行机构的故障检测与隔离目前尚缺少有效方法. 本文提出了一种新颖的解决问题途径, 利用相互关系矩阵, 通过发动机输出与控制器指令计算执行机构输出的偏差, 可以达到检测、隔离多个执行机构故障的目的. 数字仿真表明, 这一方法在航空发动机执行机构故障检测中, 具有较高的准确性.

关 键 词: 故障检测; 执行机构; 关系矩阵; 航空发动机

中图分类号: V233.7+5

文献标识码: A

Failure detection of actuators of aero engine control system by interaction matrix formulation

TAO Wenhua, YE Zhifeng

(College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Currently there is no efficient method to detect and isolate the failure of actuators, which are an integral part of aero engine control system. In this paper a novel technique was introduced, which allowed to formulate the difference about the actuators output through the controller's command output and the engine's actual output by means of interaction matrix. Therefore, the failure of multiple actuators could be detected and isolated successfully. The digital simulations demonstrate that this strategy has a high accuracy when it is applied in failures detection of the actuators of aero engine control system.

Key words: failure detection; actuator; interaction matrix; aero engine

航空发动机是一个复杂的非线性系统, 工作环境又相当恶劣, 要求控制系统具有极高的安全性、可靠性和有效性^[1-2], 这种要求有时比提高控制系统的性能更为重要, 因为系统一旦发生恶性事故就有可能造成巨大损失^[3]. 随着对航空发动机性能要求的不断提高, 发动机及其控制系统越来越复杂, 故障随时可能出现在系统中的任何一个传感器、执行器等部件上^[4-5], 这就需要控制系统能及时的检测并进行判断隔离, 实现安全意义上的容错控制^[6-7].

目前, 通过国内外很多人的研究, 航空发动机控制系统的传感器故障诊断与容错技术日趋成熟, 工程应用效果也相当可喜. 但是对执行机构故障检测的研究却比较少, 有一些这方面的研究也是基于执行机构本身的数学模型^[2], 大大增加了控制系统的质量和复杂程度, 这对于提高发动机的总体性能是不利的.

本文针对航空发动机控制系统中执行机构的常见故障, 基于控制对象发动机模型, 利用相互关系矩阵^[8]来诊断执行机构的故障.

收稿日期: 2008 08 19; 修订日期: 2008 12 21

作者简介: 陶文华(1985-), 男, 安徽南陵人, 硕士生, 主要研究方向为航空宇航推进理论与工程.

该方法对系统内部进行解耦, 通过发动机实际输出与控制器指令, 计算得到执行机构实际输出的偏差, 因而可以成功检测、隔离控制系统执行机构输出不等于输入的故障. 该方法目前很容易应用于发动机地面检修时定状态检测执行机构故障. 在建立发动机全包线状态空间模型的基础上, 也可以应用于飞行状态中的执行机构实时监控.

1 理论背景

考虑一个 n 阶, r 维输入, q 维输出的可控可观测系统

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) \\ \mathbf{y}(k) &= \mathbf{C}\mathbf{x}(k) \end{aligned} \tag{1}$$

对于 $p \geq 0$

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+p) &= \mathbf{A}^p \mathbf{x}(k) + \mathbf{G}\mathbf{u}_p(k) \\ \mathbf{y}_p(k) &= \mathbf{O}\mathbf{x}(k) + \mathbf{T}\mathbf{u}_p(k) \end{aligned} \tag{2}$$

其中 $\mathbf{u}_p(k)$ 和 $\mathbf{y}_p(k)$ 为 k 时刻经过 p 步之后的输入输出数据组成的向量. 即

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_p(k) &= \begin{bmatrix} \mathbf{u}(k) \\ \mathbf{u}(k+1) \\ \vdots \\ \mathbf{u}(k+p-1) \end{bmatrix}, \quad \mathbf{y}_p(k) = \begin{bmatrix} \mathbf{y}(k) \\ \mathbf{y}(k+1) \\ \vdots \\ \mathbf{y}(k+p-1) \end{bmatrix} \\ \mathbf{G} &= [\mathbf{A}^{p-1}\mathbf{B}, \dots, \mathbf{A}\mathbf{B}, \mathbf{B}] \\ \mathbf{O} &= [\mathbf{C}, \mathbf{C}\mathbf{A}, \dots, \mathbf{C}\mathbf{A}^{p-1}]^T \\ \mathbf{T} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \mathbf{C}\mathbf{B} & 0 & \dots & \dots & \dots \\ \mathbf{C}\mathbf{A}\mathbf{B} & \mathbf{C}\mathbf{B} & 0 & \dots & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 \\ \mathbf{C}\mathbf{A}^{p-2}\mathbf{B} & \dots & \mathbf{C}\mathbf{A}\mathbf{B} & \mathbf{C}\mathbf{B} & 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

为了考虑每个输入对系统的影响, 对 $\mathbf{x}(k+p)$ 展开

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+p) &= \mathbf{A}^p \mathbf{x}(k) + \mathbf{G}_1 \mathbf{u}_1^{(p)}(k) + \dots + \mathbf{G}_r \mathbf{u}_r^{(p)}(k) + \\ &\quad \mathbf{B}_1 \mathbf{u}_1(k+p-1) + \dots + \mathbf{B}_r \mathbf{u}_r(k+p-1) \\ \mathbf{y}_p(k) &= \mathbf{O}\mathbf{x}(k) + \mathbf{T}_1 \mathbf{u}_1^{(p)}(k) + \dots + \mathbf{T}_r \mathbf{u}_r^{(p)}(k) \end{aligned} \tag{3}$$

其中

$$\begin{aligned} \mathbf{B} &= [\mathbf{B}_1, \mathbf{B}_2, \dots, \mathbf{B}_r] \\ \mathbf{G} &= [\mathbf{A}^{p-1}\mathbf{B}_1, \dots, \mathbf{A}^2\mathbf{B}_i, \mathbf{A}\mathbf{B}_i] \\ \mathbf{u}_i^{(p)}(k) &= \begin{bmatrix} u_i(k) \\ u_i(k+1) \\ \vdots \\ u_i(k+p-2) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\mathbf{T}_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ \mathbf{C}\mathbf{B}_i & 0 & \dots & 0 \\ \mathbf{C}\mathbf{A}\mathbf{B}_i & \mathbf{C}\mathbf{B}_i & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & 0 \\ \mathbf{C}\mathbf{A}^{p-2}\mathbf{B}_i & \dots & \mathbf{C}\mathbf{A}\mathbf{B}_i & \mathbf{C}\mathbf{B}_i \end{bmatrix}$$

引入相互关系影响矩阵 $\mathbf{M}_i$

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+p) &= \mathbf{A}^p \mathbf{x}(k) + \mathbf{G}_1 \mathbf{u}_1^{(p)}(k) + \dots + \mathbf{G}_r \mathbf{u}_r^{(p)}(k) + \\ &\quad \mathbf{B}_1 \mathbf{u}_1(k+p-1) + \dots + \mathbf{B}_r \mathbf{u}_r(k+p-1) + \\ &\quad \mathbf{M}_i \mathbf{y}_p(k) - \mathbf{M}_i \mathbf{y}_p(k) = \\ &\quad (\mathbf{A}^p + \mathbf{M}_i \mathbf{O}) \mathbf{x}(k) + (\mathbf{G}_1 + \mathbf{M}_i \mathbf{T}_1) \mathbf{u}_1^{(p)}(k) + \dots + \\ &\quad (\mathbf{G}_r + \mathbf{M}_i \mathbf{T}_r) \mathbf{u}_r^{(p)}(k) - \mathbf{M}_i \mathbf{y}_p(k) + \\ &\quad \mathbf{B}_1 \mathbf{u}_1(k+p-1) + \dots + \mathbf{B}_r \mathbf{u}_r(k+p-1) \end{aligned} \tag{4}$$

可得 $k+p$ 时刻系统输出

$$\begin{aligned} \mathbf{y}(k+p) &= (\mathbf{C}\mathbf{A}^p + \mathbf{C}\mathbf{M}_i \mathbf{O}) \mathbf{x}(k) + \\ &\quad (\mathbf{C}\mathbf{G}_1 + \mathbf{C}\mathbf{M}_i \mathbf{T}_1) \mathbf{u}_1^{(p)}(k) + \dots + \\ &\quad (\mathbf{C}\mathbf{G}_r + \mathbf{C}\mathbf{M}_i \mathbf{T}_r) \mathbf{u}_r^{(p)}(k) - \mathbf{C}\mathbf{M}_i \mathbf{y}_p(k) + \\ &\quad \mathbf{C}\mathbf{B}_1 \mathbf{u}_1(k+p-1) + \dots + \mathbf{C}\mathbf{B}_r \mathbf{u}_r(k+p-1) \end{aligned} \tag{5}$$

对于第 i 个输入, 令上述方程中状态量 $\mathbf{x}(k)$ 的系数和非第 i 个输入的 $\mathbf{u}_j^{(p)}(k)$ 的系数为零, 得 $\mathbf{C}\mathbf{M}_i$ 加强条件

$$\begin{aligned} \mathbf{C}\mathbf{A}^p + \mathbf{C}\mathbf{M}_i \mathbf{O} &= 0 \\ \mathbf{C}\mathbf{G}_j + \mathbf{C}\mathbf{M}_i \mathbf{T}_j &= 0, \quad \forall j \neq i \end{aligned} \tag{6}$$

即对于第一个输入 $i=1$, $\mathbf{C}\mathbf{M}_i$ 必须满足

$$\mathbf{C}\mathbf{M}_1 [\mathbf{O}, \mathbf{T}_2, \dots, \mathbf{T}_r] = -[\mathbf{C}\mathbf{A}^p, \mathbf{C}\mathbf{G}_2, \dots, \mathbf{C}\mathbf{G}_r] \tag{7}$$

在式 (6) 中 $\mathbf{C}\mathbf{M}_i$ 共有未知数 q^2 个 ($\mathbf{C}$ 为 $q \times n$ 矩阵, $\mathbf{M}_i$ 为 $n \times qp$ 矩阵)

$$q \times qp = pq^2$$

而方程总数为

$$qn + (r-1)q(p-1)$$

所以

$$pq^2 \geq n + (r-1)q(p-1)$$

为 $\mathbf{C}\mathbf{M}_i$ 存在 ($\mathbf{M}_i$ 存在) 的必要条件.

即 p 必须满足

$$p(q-r+1) \geq n-r+1 \tag{8}$$

在这个条件下, $\mathbf{M}_i$ 矩阵的列数至少等于行数, 根据这个结构, 还有本身所包含的信息可知, 对于独立的输入, 该矩阵一般为列满秩, 这样, 只要式 (8) 满足, 该矩阵一定存在.

同时也要求

$$q-r+1 > 0$$

即独立的传感器数至少等于独立的执行机构数 ($q \geq r$), 这样在众多执行机构中的故障才能被辨别。

对于第 i 个输入

$$\mathbf{y}(k+p) = (\mathbf{CG}_i + \mathbf{CM}_i \mathbf{T}_i) \mathbf{u}^{(p)}(k) - \mathbf{CM}_i \mathbf{y}_p(k) + \mathbf{CB}_i \mathbf{u}_1(k+p-1) + \dots + \mathbf{CB}_i \mathbf{u}_r(k+p-1) \quad (9)$$

令

$$\mathbf{N}_i^T (\mathbf{CB}_j) = 0, \quad \forall j \neq i$$

即寻找 $\mathbf{CB}_j$ 正交向量 $\mathbf{N}_i^T$ ($q \geq r$, 因此不难找到). 将 $\mathbf{N}_i^T$ 代入式(9)

$$\mathbf{N}_i^T \mathbf{y}(k+p) = \mathbf{N}_i^T (\mathbf{CG}_i + \mathbf{CM}_i \mathbf{T}_i) \mathbf{u}^{(p)}(k) - \mathbf{N}_i^T \mathbf{CM}_i \mathbf{y}_p(k) + \mathbf{N}_i^T \mathbf{CB}_i \mathbf{u}_i(k+p-1) \quad (10)$$

考虑到执行机构故障即为其实际输出(亦即控制对象的实际输入)不等于其输入(控制器指令), 假设其偏差量为 $z_i(k)$, 则控制对象的实际输入 $u_i(k)$ 为控制器指令 $\bar{u}_i(k)$ 与偏差量 $z_i(k)$ 的和, 将 $z_i(k)$ 代入式(10)

$$\begin{aligned} \mathbf{N}_i^T \mathbf{y}(k+p) &= \mathbf{N}_i^T (\mathbf{CG}_i + \mathbf{CM}_i \mathbf{T}_i) \cdot \\ &[\bar{\mathbf{u}}_i^{(p)}(k) + \mathbf{z}_i^{(p)}(k)] - \mathbf{N}_i^T \mathbf{CM}_i \mathbf{y}_p(k) + \\ &\mathbf{N}_i^T \mathbf{CB}_i [\bar{\mathbf{u}}_i(k+p-1) + \mathbf{z}_i(k+p-1)] \end{aligned} \quad (11)$$

则执行机构故障所产生的偏差 $z_i(k)$ 带来的控制对象输出偏差如下:

$$\begin{aligned} e_i(k+p) &= \\ \mathbf{N}_i^T (\mathbf{CG}_i + \mathbf{CM}_i \mathbf{T}_i) \mathbf{z}_i^{(p)}(k) &+ \mathbf{N}_i^T \mathbf{CB}_i \mathbf{z}_i(k+p-1) \end{aligned} \quad (12)$$

即

$$\begin{aligned} e_i(k+p) &= \mathbf{N}_i^T \mathbf{y}(k+p) + \mathbf{N}_i^T \mathbf{CM}_i \mathbf{y}_p(k) - \\ \mathbf{N}_i^T (\mathbf{CG}_i + \mathbf{CM}_i \mathbf{T}_i) \bar{\mathbf{u}}_i^{(p)}(k) &- \mathbf{N}_i^T \mathbf{CB}_i \bar{\mathbf{u}}_i(k+p-1) \end{aligned} \quad (13)$$

那么

$$\begin{aligned} e_i(k) &= \mathbf{N}_i^T \mathbf{y}(k) + \mathbf{N}_i^T \mathbf{CM}_i \mathbf{y}_p(k-p) - \\ \mathbf{N}_i^T (\mathbf{CG}_i + \mathbf{CM}_i \mathbf{T}_i) \bar{\mathbf{u}}_i^{(p)}(k-p) &- \mathbf{N}_i^T \mathbf{CB}_i \bar{\mathbf{u}}_i(k-1) \end{aligned} \quad (14)$$

展开

$$\begin{aligned} e_i(k) &= \alpha_0 \mathbf{y}(k) + \alpha_1 \mathbf{y}(k-1) + \dots + \alpha_p \mathbf{y}(k-p) + \\ \beta_1 \bar{\mathbf{u}}_i(k-1) &+ \beta_2 \bar{\mathbf{u}}_i(k-2) + \dots + \beta_p \bar{\mathbf{u}}_i(k-p) \end{aligned} \quad (15)$$

其中

$$[\alpha_p, \alpha_{p-1}, \dots, \alpha_1, \alpha_0] = [\mathbf{N}_i^T \mathbf{CM}_i, \mathbf{N}_i^T] \quad (16)$$

$$[\beta_p, \beta_{p-1}, \dots, \beta_2, \beta_1] =$$

$$- [\mathbf{N}_i^T (\mathbf{CG}_i + \mathbf{CM}_i \mathbf{T}_i), \mathbf{N}_i^T \mathbf{CB}_i] \quad (17)$$

这样, 通过观察 $e_i(k)$ 的值就可以判断第 i 个执行机构是否发生故障. 理论上无故障时 $z_i(k) = 0$, 即 $e_i(k) = 0$, 所以, 当 $e_i(k) \neq 0$, 说明第 i 个执行机构发生故障, 其值越大, 执行机构偏移量 $z_i(k)$ 越大。

2 应用

下面针对某型航空发动机模型进行验证。

由于航空发动机是一个非线性系统, 取其在零高度零马赫数时设计点附近稳态工作点进行增量归一化处理后的线性化离散状态空间模型

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k)$$

$$\mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) + \mathbf{D}\mathbf{u}(k)$$

其中 $\mathbf{u} = [w; A_9]$, 两个输入量分别为主燃油量和尾喷口面积; $\mathbf{x} = [N_1; N_h]$, 状态量选择为发动机高、低压转子转速. 输出量不影响系统状态, 为简化对象, 只选择最能代表发动机工作状态的高、低压转子转速, 则 $n = q = r = 2$ (也满足 $q \geq r$). 由式(8)选择: $p = 2$ ($p \geq 1$, 为了反映式(15)~(17)系数的一般性, 故选择两项, 太多则导致机载系统计算量过大, 且在非线性模型解耦不是很理想的情况下诊断精度大大降低). 文中, 执行机构 1 为主燃油执行机构, 执行机构 2 为尾喷口执行机构。

故障检测系统原理和程序计算流程如图 1、图 2 所示。

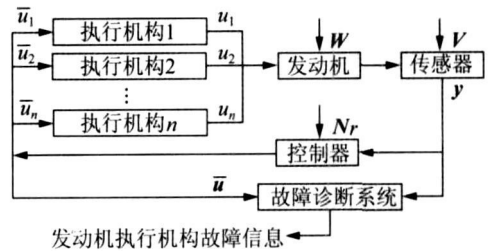


图 1 执行机构故障检测原理

Fig. 1 Principle of actuators fault detection

1) 执行机构无故障, 给系统输入 $\mathbf{u} = [1; 0]$, 输出如图 3 所示. 可见 e_1 可以迅速收敛达到稳态, 理想情况下 e_1 应该为零, 此时稳态值为 0.000043. 为了说明相对误差, 找到 $e_1 = 0$ 的状态, 此时 $u_1 = 1.000163$, $\bar{u}_1 = 1$, 则其相对误差精度为 $(1.000163 - 1)/1 = 0.0163\%$, 相应的执行机构 2 为 $(1.00000475 - 1)/1 = 0.000475\%$, 满足实际需求. 此偏差产生的主要原因是计算过程中的舍入误差, 在保留四位小数的情况下即为理想状态, 不会出现故障的误报。

2) 执行机构出现固定漂移故障(恒偏差故

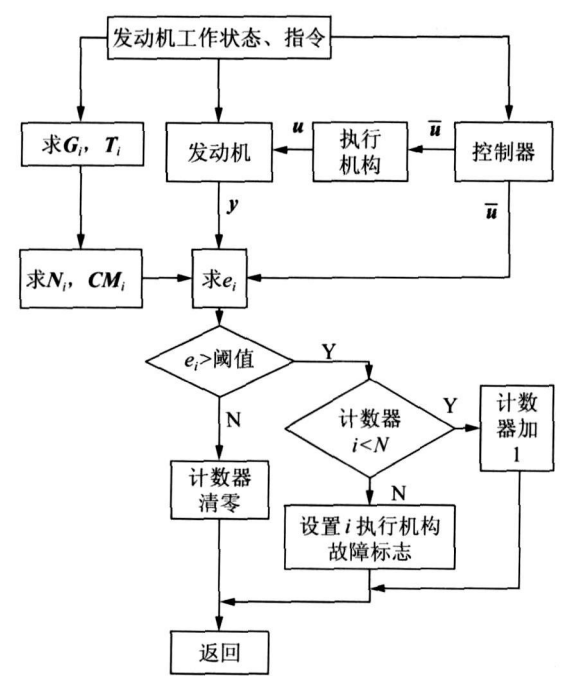


图 2 计算流程图

Fig. 2 System program flow diagram

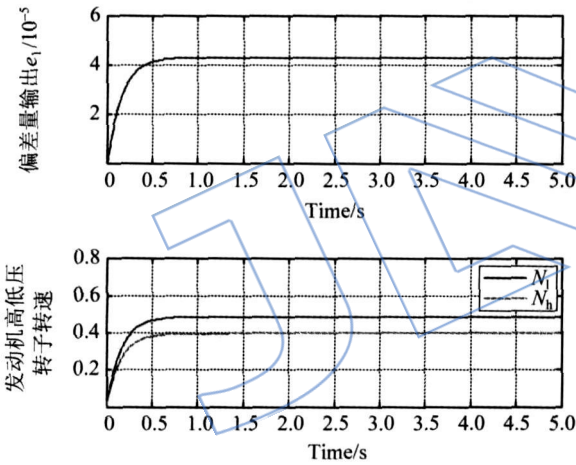


图 3 执行机构无故障时系统输出

Fig. 3 System output with no actuator failure (AF)

障, 液压机械中由于回程误差等原因经常出现的故障)和随时间累积的恒增益故障(一些缓慢的漂移或执行机构由于老化等不自主的松动发生的漂移). 以两执行机构同时发生同种类型(恒偏差)和不同种类型(恒偏差和恒增益)故障为例说明.

在 1.5~2.5 s 之间对尾喷口执行机构施加 1% 正漂移故障, 2~3 s 之间对主燃油执行机构施加 1% 正漂移故障, 如图 4 所示. e 很容易判断发生了突变(e 的阈值稍后确定), 这对于硬故障的检测很准确.

在 1.5~2.5 s 之间对尾喷口执行机构施加

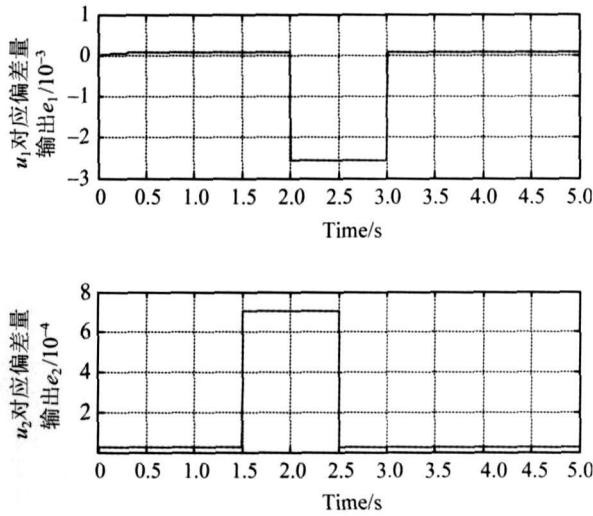


图 4 执行机构 1% 正增益故障系统输出

Fig. 4 System output with 1%+ offset AF

1% 正漂移故障, 2~3 s 之间对主燃油执行机构施加斜率为 0.5 的斜坡故障, 如图 5 所示. 对于两执行机构故障的检测都很准确, 对于软故障能进行准确检测. 且在执行机构 1 故障逐渐增大的情况下, 执行机构 2 故障的检测效果并没有受到明显的影响.

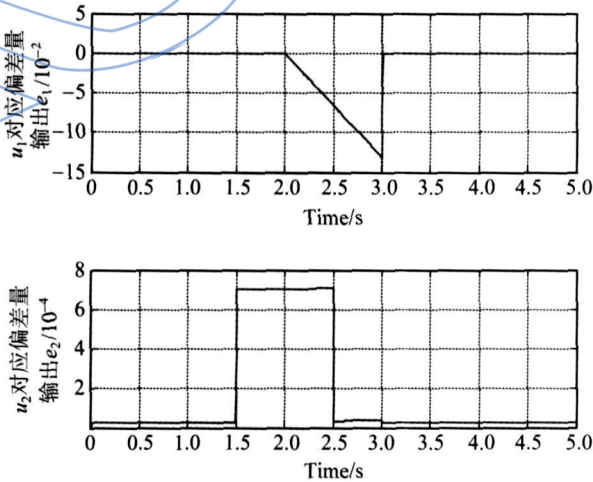


图 5 执行机构 1% 正增益和随时间漂移故障时系统输出

Fig. 5 System output with 1%+ offset AF and constant gain about time AF

3) 执行机构出现卡死故障, 这是最为严重的故障. 即 u 不能跟随 $\bar{u}$ 的变化, 且为某一恒定值. 本文中不允许两执行机构同时卡死, 否则发动机状态无法调节, 以其中之一卡死进行说明. 执行机构 1 处在 $u_1 = \bar{u}_1 = 1$ 时, 在 1.5 s 给指令 $\bar{u}_1$ 以 0.5 单位斜坡加大供油量, 而 u_1 在跟随到 1.125 (1.75 s) 时卡死固定, $\bar{u}_1$ 仍持续加大至 1.25 (2 s) 后, 以 0.5 单位斜坡减小供油量至初

始状态 $\bar{u}_i = 1$. 如图 6 可以准确检测故障(执行机构 2 类似).

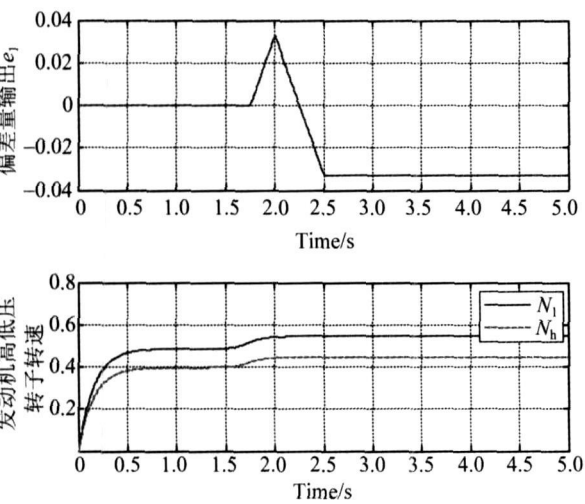


图 6 执行机构卡死故障时系统输出
Fig. 6 System output with constant output AF

3 检测中 e 阈值的确定

下面以执行机构 1 恒偏差故障为例来确定 e 的阈值. 阈值太大会导致故障漏报, 太小则容易误报. 考虑控制器指令 0.15% 噪声(标准正态分布, 方差 0.0005, 均值为 0, 下同), 在 1.5~2.5s 施加主燃油量 0.5% 正漂移, 如图 7. 考虑到发动机控制系统工作条件的恶劣, 为了提高可靠性可大致将阈值设为 $|e_i| < 0.5 \times 10^{-3}$, 可以成功实现对主燃油量 0.5% 以上的偏移故障的检测(对于执行机构 2 上述两项指标分别为 0.5×10^{-4} , 1%). 这里默认来自传感器的发动机输出量经过了滤波处理.

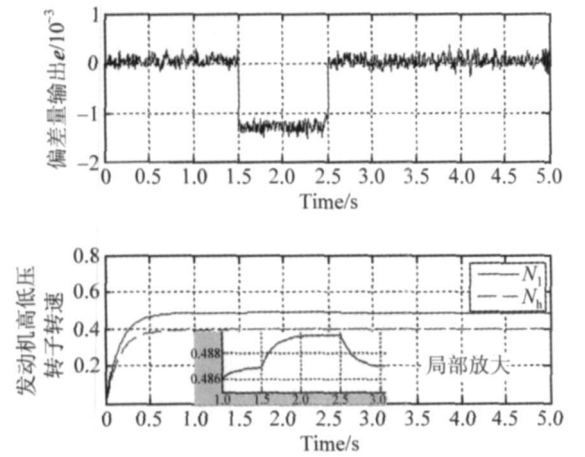


图 7 控制器指令 0.15% 噪声下 0.5% 正增益故障系统输出
Fig. 7 System output with 0.5%+ offset AF and input noise

实际控制系统中, 发动机输入输出量均受到不同程度的噪声污染, 如果发动机输出量不经过滤波处理直接进入检测系统, 对于正常系统的闭环运行倒没有太大危害, 但对于检测的准确性却有着至关重要的影响. 仿真表明发动机输入噪声对该检测系统影响并不大, 但输出噪声的影响则很严重. 图 8(图(a)为输出量带噪声, 图(b)为输入量带噪声)对比图 4, 同一条件下仍采用上述阈值, 当输出量的测量噪声很大时(0.3%), 将无法实现准确的故障检测. 此时对发动机输出量进行滤波是必要的, 滤波后的参数能成功检测文中所述执行机构各种故障. 对图 8 工况下输出量经 Kalman 滤波器处理后检测时故障特征十分明显, 效果与图 4 非常接近.

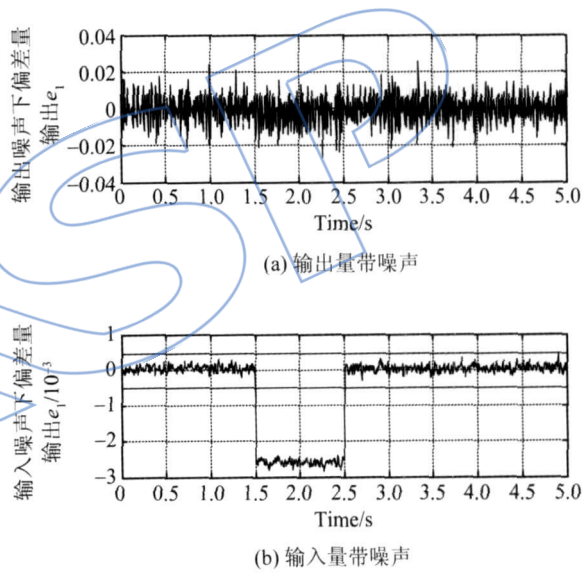


图 8 在图 4 工况下发动机输出输入量带噪声时系统输出

Fig. 8 System output with plant output noise and input noise at Fig 4

4 结 论

本文通过基于控制对象的方法, 即应用相互关系矩阵将发动机控制器指令与执行机构实际输出的差异(即执行机构故障)通过发动机输出的偏差表现出来, 很便捷的实现了对执行机构常见故障的检测. 数字仿真表明该方法切实可行, 具有较高的检测准确性. 同时, 该方法可以推广到多执行机构故障的检测、隔离以及实时控制系统的在线检测.

最后要说明的是, 本文最终的应用背景是基于发动机的非线性模型, 其中有很多影响因素限

制了检测效果,影响了参数的选择. 本文某些参数也是出于这个考虑,为提高系统非线性模型下的兼容性、鲁棒性做出的选择,限于篇幅,本文只给出了在线性模型中开环系统下的检测效果.

参考文献:

[1] 叶志锋, 孙建国. 基于概率神经网络的发动机故障诊断 [J]. 航空学报, 2002, 23(2): 155-157.
YE Zhifeng, SUN Jianguo. Probabilistic neural networks based engine fault diagnosis[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2002, 23(2): 155-157. (in Chinese)

[2] 蒋平国, 姚华, 孙建国. 航空发动机数控系统执行机构回路故障诊断和容错控制方法[J]. 航空动力学报, 2005, 20(2): 282-286
JIANG Pingguo, YAO Hua, SUN Jianguo. Method of fault diagnosis and fault-tolerant control for actuator loop in aeroengine digital control system[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(2): 282-286. (in Chinese)

[3] Gundes A N. Controller design for reliable stabilization [C]// Proceedings of 12th IFAC World Congress. Syd-

ney, Australia: IFAC, 1993, 4: 1-4

[4] 黄向华. 航空发动机智能容错数字控制[J]. 应用基础与工程科学学报, 2005, 13(4): 366-372.
HUANG Xianghua. Intelligent fault-tolerant digital control systems of aeroengines[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2005, 13(4): 366-372. (in Chinese)

[5] Chen R H, Speyer J L. Sensor and actuator fault reconstruction[J]. Journal of Guidance, Control and Dynamics, 2004, 27(2): 186-196

[6] Hsu P L, Lin K L, Shen L C. Diagnosis of multiple sensor and actuator failures in automotive engines[J]. Vehicular Technology IEEE Transactions on, 1995, 44(4): 779-789

[7] Larson E C, Parker B E Jr., Clark B R. Model-based sensor and actuator fault detection and isolation[C]// Proceeding of the American Control Conference. Anchorage, Alaska: IEEE, 2002, 5: 4215-4219

[8] Koh B H, Li Z, Dharap P, et al. Actuator failure detection through interaction matrix formulation[J]. Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2005, 28(5): 895-901